



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE MINERALÓGICA E POTENCIAL PARA ROCHAGEM
(REMINERALIZAÇÃO) DO MICAXISTO DA FORMAÇÃO
XAMBIOÁ, NORTE DO TOCANTINS.**

Apresentado por:

Aluno: MAYLOM RUAN PAIXÃO DA SILVA

Orientadora: Profa. Dra. ROSEMERY DA SILVA NASCIMENTO

BELÉM, PARÁ
JUNHO, 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE MINERALÓGICA E POTENCIAL PARA ROCHAGEM
(REMINERALIZAÇÃO) DO MICAXISTO DA FORMAÇÃO
XAMBIOÁ, NORTE DO TOCANTINS.**

Apresentado por:

Aluno: MAYLOM RUAN PAIXÃO DA SILVA

Orientadora: Profa. Dra. ROSEMERY DA SILVA NASCIMENTO

BELÉM, PARÁ
JUNHO, 2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

S586a Silva, Maylom Ruan Paixão.

Análise mineralógica e potencial para rochagem (remineralização) do micaxisto da Formação Xambioá, norte do Tocantins / Maylom Ruan Paixão Silva. — 2021.

xiii, 54 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Rosemery da Silva Nascimento
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2021.

1. Remineralizadores. 2. Agromineral. 3. Mineralogia. 4. Faixa Araguaia. I. Título.

CDD 552.4098117



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE MINERALÓGICA E POTENCIAL PARA ROCHAGEM
(REMINERALIZAÇÃO) DO MICAXISTO DA FORMAÇÃO XAMBIOÁ,
NORTE DO TOCANTINS.**

Apresentado por:

MAYLOM RUAN PAIXÃO DA SILVA

**Como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em
Geologia, área de concentração Geociências, linha de pesquisa em
mineralogia e rochagem**

Data da defesa: 18/06/2021

Conceito: Excelente

Banca Examinadora:

Prof. Rosemary da Silva Nascimento – Orientadora
(Dra. em Geociências - UFPA)

Prof. Evaldo Raimundo Pinto da Silva – Membro interno
(Dr. em Geologia Econômica – UFPA)

Prof. Anderson Martins de Souza Braz – Membro externo
(Dr. em Geologia e Geoquímica - UFPA)

**À toda a minha família,
em especial ao meu avô Bernal Gama (*in memoriam*).**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre comigo em todos os momentos, vencendo todos os obstáculos e os momentos mais difíceis da minha vida.

À minha mãe Ana Nilce Paixão pelo amor incondicional, por ser essa mulher incrível, muito dedicada e que me incentivou sempre nos estudos. A minha irmã caçula Rayca Nicole Paixão, pelo amor, carinho e afeto.

Ao meu avô Bernal Gama (*In memoriam*), que tenho certeza, está muito orgulhoso desta minha conquista.

Ao Instituto de Geociência (IG) da UFPA, pelo suporte em toda minha fase de graduação, principalmente na infraestrutura para a realização deste trabalho, a Faculdade de Geologia, pelo seu ensinamento científico pessoal durante todos esses longos anos.

À Profa. Dra. Rosemery da Silva, orientadora deste trabalho, por todo o seu conhecimento, ensinamentos e toda paciência durante a realização do TCC.

Aos meus amigos da graduação, Tiago Marinho que sempre me ajudou na confecção de mapas e afins, Carlos Pedroso que me ajudou na descrição petrográfica de algumas amostras, e ao Victor vale que me deu dicas importantes sobre o trabalho.

Ao meu irmão Ronald Allan que contribuiu dando dicas e conselhos na realização deste trabalho.

A todos os outros professores, em especial ao Prof. Dr. Roberto Vizeu que me deu a oportunidade de ser monitor em geologia estrutural, e aos funcionários do IG que de alguma forma contribuíram na minha vida e deste trabalho.

Aos meus amigos da vida e todos meus colegas não citados e que se tornaram geólogos e de alguma forma auxiliam na minha vida.

RESUMO

A agricultura é um dos setores que mais cresce no Brasil, diante disso o consumo por fertilizantes convencionais vem aumentando paralelamente, onde a maior parte desses insumos agrícolas são importados e acabam pesando na balança comercial. Além disso, a grande geodiversidade que o país possui, em termos de rochas, vem consolidando técnicas como rochagem/remineralização, como alternativa viável na busca de soluções para problemas dentro do setor agrícola, sendo uma opção no fornecimento de nutrientes para o solo, com possibilidade de substituir em parte os fertilizantes convencionais no Brasil. Para realização da pesquisa foram estudadas amostras de micaxistos aflorantes dentro dos limites de exploração da Empresa Minerax. Estas rochas pertencem a Formação Xambioá (Grupo Estrondo) no Estado do Tocantins dentro da unidade geológica descrita na literatura como Faixa Araguaia. O objetivo principal do trabalho é identificar os principais constituintes mineralógicos e químicos das amostras de micaxisto, a fim de avaliar o seu potencial como remineralizador de solo e fonte de nutrientes para as plantas. O estudo metodológico proposto envolveu essencialmente levantamento bibliográfico acerca da geologia do micaxisto da Formação Xambioá, além da realização das análises petrográficas e de difração de raios-X (DRX). Os resultados revelaram que a composição mineralógica das amostras de micaxistos estudadas apresenta potencial para o fornecimento de nutrientes, como K, Ca, Mg e Fe, considerando a presença de minerais do grupo das micas, além de feldspatos do tipo albita e anortoclásio. No entanto, as análises indicam teores de 28 a 44% de quartzo na rocha, sendo um mineral inerte, estes teores não se encaixam nas normas específicas dos remineralizadores (IN MAPA 05 e 06/2016) que considera até 25% de SiO₂ livre (quartzo), sendo o limite máximo para adequação dos remineralizador. Contudo, a opção de um *blend* (mistura) com outras rochas, é uma alternativa para que os xistos da Formação Xambioá, classificados como resíduo na área de exploração da Empresa Minerax, sejam considerados como uma rocha com potencial para uso agrícola em culturas como feijão, milho e/ou mandioca.

Palavras-chave: Remineralizadores. Agromineral. Mineralogia. Faixa Araguaia

ABSTRACT

The agriculture is one of the sectors that has growing up the most in Brazil, in view of that the consumption of conventional fertilizers has been increasing in parallel, where the biggest part of these agricultural inputs are imported and end up weighing on the trade balance. Besides, the great biodiversity that the country has, in terms of rocks, has been consolidating techniques as stonework/remineralization, as a viable alternative in the search for solution to problems within the agricultural sector, being an option in providing nutrients for the soil, with the possibility of partially replacing conventional fertilizers in Brazil. To carry out the search were studied samples of outcropping mica schist within the limits of exploration of the Minerax Company. These rocks belong to the Xambioá Formation (Estrondo group) in the State of Tocantins in the geological unit described in the literature as Araguaia Belt. The main objective of this work is to identify the mineralogical and chemical constituents of the mica schist samples, in order to evaluate its potential as a soil remineralizer and a source of nutrients for plants. The proposed methodological study essentially involved a bibliographic survey about the geology of the Xambioá Formation mica schist, in addition to the performance of petrographic and X-ray diffraction (XRD) analyses. The results revealed that the mineralogical composition of the mica schist samples studied presents potential for the supply of nutrients such as K, Ca, Mg and Fe, considering the presence of minerals from the mica group, in addition to albite and anorthoclase feldspars. However, the analyzes indicate levels of 28 to 44% of quartz in the rock, being an inert mineral, these levels do not fit the specific standards of remineralizers (IN MAPA 05 and 06/2016) which consider up to 25% SiO₂ free (quartz), being the maximum limit for suitability of remineralizers. However, the option of a blend (mixture) with other rocks is an alternative for the Xambioá Formation shales, classified as waste in the Minerax Company exploration area, to be considered as a rock with potential for agricultural use in crops such as beans, corn and/or manioc.

Keywords: Remineralizers. Agromineral. Mineralogy. Araguaia Belt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - A) Mapa de localização do estado do Tocantins no Brasil. B) Mapa regional da localização da área de estudo, próximo da divisa estadual do estado do Pará com o Tocantins. C) Mapa simplificado de localização da área em questão, próximo do Município de Xambioá-TO, destacando os limites de exploração mineral da Empresa Minerax..... 4
- Figura 2 - Mapa geológico do Faixa Araguaia com indicação das idades das principais unidades litoestratigráficas, incluindo o embasamento e unidades do Neoproterozóico, destacando o Grupo Estrondo onde está inserida a Formação Xambioá (Gorayeb *et al.* 2008). 9
- Figura 3 - Coluna litroestratigráfica geral da Faixa Araguaia destacando o Supergrupo Baixo Araguaia, onde estão inseridos o Grupo Estrondo e a Formação Xambioá. Modificado de Alvarenga *et al.* (2000) e Gorayeb *et al.* (2008). 11
- Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo e adjacências, Escala 1:125.000 (Modificado da Folha Xambioá - SB.22-Z-B - Escala 1:250.000 – CPRM 1997). 16
- Figura 5 – Mapa de classificação de solo da área de estudo e adjacências. (Modificado do IBGE 2019)..... 18
- Figura 6 - Esquema que resume a estabilidade dos principais minerais e rochas ao intemperismo. Série de Bowen (Lepsch 2011, modificado de Theodoro 2020). 22
- Figura 7 - Visão geral de um dos afloramentos da Formação Xambioá na área de exploração da Minerax, destacando (em amarelo) o contato concordante entre xisto e mármore, bem como a intercalação de camadas entre os dois conjuntos litológicos..... 33
- Figura 8 - Detalhe do contato entre micaxisto e do mármore da Formação Xambioá, dentro da área de exploração da empresa Minerax..... 34
- Figura 9 - Detalhe do micaxisto da Formação Xambioá em afloramento. A) Vista em planta do afloramento de micaxisto destacando a foliação bem definida, além de porções fraturadas e intemperizadas. B) Detalhe do plano da foliação em micaxisto destacando a lineação mineral do quartzo..... 35

- Figura 10 - Exemplares de micaxisto da Formação Xambioá. A) Amostra de rocha com dobras pegmatíticas formando ângulo agudo com a xistosidade, indicando diferentes pulsos de deformação. B) Detalhe da granulação gradacional da rocha com cristais de diferentes tamanhos (variando de fino a médio)..... 36
- Figura 11 – Aspecto geral da textural lepidoblástica da lâmina MX-00, os cristais de quartzos (Qtz) ocorrem em maior proporção na lâmina. A flogopita (Phl) também é um mineral abundante na rocha com maior facilidade de intemperismo. É possível observar que alguns cristais de feldspatos estão em processo de alteração (caulinização). A) luz natural; B) nicóis cruzados. 37
- Figura 12 – Aspecto textural geral da lâmina MX-01 com o domínio de quartzo (Qtz) e biotita (Bt) definindo a xistosidade da rocha. É possível observar também cristais de muscovita (Ms) e minerais opacos, possivelmente óxidos de ferro. A) luz natural; B) nicóis cruzados..... 38
- Figura 13 - Aspectos texturais e mineralógico da lâmina da amostra de micaxisto MX-02. A rocha apresenta textura lepidoblástica definida pela orientação dos cristais de biotita (Bt), muscovita (Ms) e quartzo (Qtz). Os cristais de Bt e Ms apresentam granulação fina e por vezes média, sendo uma das características físicas que interferem diretamente na moagem da rocha, principalmente no manejo das culturas de longo e curto prazo. A) luz natural. B) nicóis cruzados. 38
- Figura 14 - Difratoograma de difração de raios-X do pó do micaxisto da Pedreira da Empresa Minerax. O eixo x representa 2θ (Cu) e o y representa a intensidade dos reflexos..... 40

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Indicadores do mercado de fertilizantes em toneladas, de 2016 a 2019 (ANDA 2020).	19
Tabela 2 - Oferta e demanda de feijão da safra de 2015/2016 a 2020/2021 no Brasil (Conab 2020).	28
Tabela 3 - Evolução da área plantada e produção nacional da safra de milho de 2017/2018 até 2020/2021 (Conab 2020).	30
Tabela 4 - Gráfico da área plantada de mandioca no Brasil por hectares (Fernandes 2017).	31
Tabela 5 - Percentual da produção de mandioca (t/ha) no território nacional (Fernandes 2017).	31
Tabela 6 - Mineralogia qualitativa do micaxisto por análise de espectro de DRX.	40
Tabela 7 – Fórmula química e conteúdo de potássio (expresso como elemento e óxidos) em minerais formadores de rochas silicáticas.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CTC - Capacidade de Troca de Cátions

DRX – Difração de Raios-X

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPT – Elementos potencialmente tóxicos

IBD - Associação de Certificação Instituto Biodinâmico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NPK – Nitrogênio, fósforo e potássio

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELA	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	3
1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO A ÁREA DE ESTUDO	3
2 METODOLOGIA DE PESQUISA	5
2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	5
2.2 COLETA E TRATAMENTO DE AMOSTRAS	5
2.3 ANÁLISES PETROGRÁFICAS	6
2.4 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	6
3 CONTEXTO GEOLÓGICO DA FAIXA ARAGUAIA	8
3.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DO EMBASAMENTO DA FAIXA ARAGUAIA	9
3.2 SUPERGRUPO BAIXO ARAGUAIA	12
3.2.1 Grupo Estrondo	12
3.2.2 Grupo Tocantins	12
3.3 GRANITÓIDES	13
4 GEOLOGIA DA ÁREA DA EMPRESA MINERAX	14
4.1 FORMAÇÃO XAMBIOÁ	14
4.2 MINERALOGIA DO SOLO DA MINERAX	17
5 BREVE HISTÓRICO DA GEO CULTURA, ROCHAGEM E/OU REMINALIZAÇÃO DO SOLO NO BRASIL	19
6 ROCHAGEM E REMINALIZAÇÃO DOS SOLOS COM MICAXISTOS	24

7 POTENCIAL DO PÓ DE ROCHA DO MICAXISTO NO USO DE ROCHAGEM E/OU REMINERALIZAÇÃO DOS SOLOS PARA DIFERENTES CULTURAS	27
7.1 FEIJÃO	27
7.2 MILHO	28
7.3 MANDIOCA	30
8 RESULTADOS	33
8.1 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA	34
8.1.1 Análise petrográfica em micaxisto	34
8.2 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	39
8.2.1 Análise por DRX no micaxisto	39
9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
10 CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE A – FICHAS PETROGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor no setor agrícola, por consequência precisa de um alto consumo de fertilizantes convencionais, principalmente formulados em NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) que são na maioria das vezes importados e representam peso importante na economia do país (Nascimento & Lapido-Loureiro 2004). Devido ao elevado preço destes produtos no mercado internacional e por serem facilmente lixiviados por água meteórica e/ou irrigação, o setor agrícola vem procurando novas alternativas que possa diminuir o consumo de fertilizantes convencionais e melhorar ainda mais o fornecimento de macro e micronutrientes para o sistema solo-planta.

A rochagem/remineralização foi uma das alternativas implementadas no Brasil, pois representa uma prática de baixo custo financeiro que utiliza rochas moídas adicionadas diretamente ao solo como fonte de nutrientes, possibilitando a produtividade por um período curto ou mais longo devido a lenta solubilidade dos minerais. Esta tecnologia foi iniciada no país com o uso de rochas carbonáticas, utilizado para modificar o pH do solo (calagem) (Wietholter 2000). Atualmente, umas das novas implementações é o uso de rochas silicáticas que apresentam grande potencial como remineralizador e foram acrescentados como novos insumos agrícolas na Lei 12.890, de 10 de dezembro de 2013 dos fertilizantes do Brasil (Brasil 2013).

Essa nova diversidade de remineralizadores possibilitou o uso de diferentes litotipos no setor agrícola, mas o conhecimento mineralógico é de grande importância para avaliar se o pó de rochas silicáticas é adequado no fornecimento de nutrientes para o solo. Para confirmar, se a rocha silicática ou de outra composição se enquadra como um remineralizador, é essencial o estudo detalhado, no que diz respeito a composição mineralógica e química, assim como, a granulação/granulometria, texturas e processos de alterações naturais e/ou laboratoriais.

Desta forma, o presente estudo visa caracterizar a composição mineralógica de micaxisto da Formação Xambioá (TO) com amostras cedidas pela empresa Minerax que atua na exploração de mármore que afloram intercalados aos micaxistos. O uso do pó de micaxisto no setor agrícola é bem recente, as pesquisas que abordam o tema são escassas (Resende *et al.* 2005, 2006c, Machado *et al.* 2005, Castro *et al.* 2005, Theodoro *et al.* 2013, Batista *et al.* 2013, Souza *et al.* 2013, 2016, Doumer *et al.* 2016), no entanto, muitos destes trabalhos os ensaios agronômicos apresentaram resultados positivos/atrativos utilizando esta rocha como agromineral, sendo uma nova opção para esse setor.

1.1 OBJETIVO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo principal a identificação dos principais constituintes mineralógicos e químicos do micaxisto da Formação Xambioá (TO), a fim de avaliar o seu potencial no manejo da rochagem/remineralizador, contribuindo com a liberação de macro e micronutrientes para o sistema solo-planta.

Os objetivos específicos incluíram:

- Levantamento bibliográfico da cartografia geológica da região de ocorrência da Formação Xambioá dentro da Faixa ou Cinturão Araguaia;
- Levantamento bibliográfico acerca do conhecimento do uso da técnica de rochagem/remineralização e seus benefícios para o setor agrícola;
- Caracterizar a mineralogia a composição química do micaxisto, por meio da realização de análises petrográficas e análises laboratoriais (DRX);
- Levantamento de exemplos de culturas/plantios onde o manejo do pó do micaxisto venha contribuir com seu desenvolvimento em futuros ensaios agrônômicos.

1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO A ÁREA DE ESTUDO

As amostras de rocha analisadas neste trabalho foram coletadas no Município de Xambioá (TO), norte do estado do Tocantins (TO), próximo à divisa estadual com o Pará, durante a realização da disciplina Prática Integrada de Campo em Petrologia, da Faculdade de Geologia (IG). A coleta foi realizada dentro do limite territorial pertencente a empresa Minerax do Grupo J. Demito, com autorização da coleta permitida. No contexto cartográfico, o material coletado está inserido na Folha planialtimétrica SB.22-Z-B (Xambioá) na escala 1:250.000 e compreende a região delimitadas pelas as coordenadas (48°24'57,702"W / 6°22'43,117"S), (48°24'5,971W / 6°22'43,117"S), (48°24'57,702"W / 6°23'25,94"S), (48°24'5,971"W / 6°23'25,94"S).

O acesso até a área de estudo a partir de Belém, foi feita pela PA-150 até o Município de Marabá, depois segue-se pela PA-230 em torno de 40 km até a BR-153, passando pelo Município São Domingos do Araguaia (PA), continuando por essa mesma rodovia até o Município de São Geraldo do Araguaia (PA), onde por meio de uma balsa se faz a travessia do Rio Araguaia até o Município de Xambioá (TO).

Em seguida, o acesso é feito pela TO-164, em torno de 9 km seguindo a orientação nordeste e percorrendo mais 8 km de estrada não pavimentada, a coleta foi feita dentro dos limites de exploração da Empresa Minerax de uma pilha de resíduo de mineração (Figura 1).

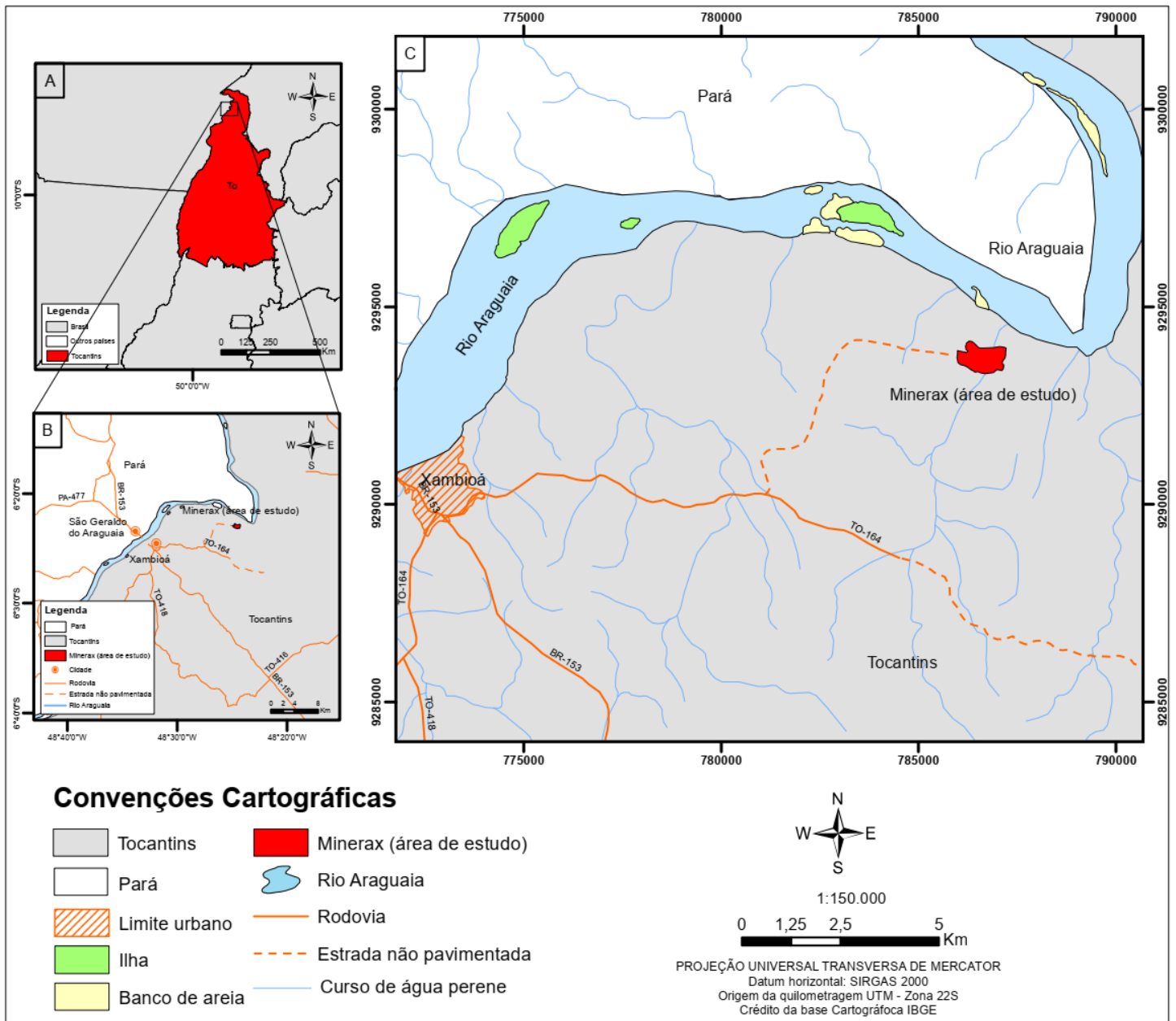


Figura 1 - A) Mapa de localização do estado do Tocantins no Brasil. B) Mapa regional da localização da área de estudo, próximo da divisa estadual do estado do Pará com o Tocantins. C) Mapa simplificado de localização da área em questão, próximo do Município de Xambioá-TO, destacando os limites de exploração mineral da Empresa Minerax.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

As atividades metodológicas realizadas nesta monografia de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) envolveram principalmente a pesquisa bibliográfica e estudos laboratoriais das amostras coletadas, especificamente, análises petrográficas e de difração de raios-X (DRX), com o objetivo de determinar minerais e argilominerais com potencial de disponibilizar (elementos químicos) nutrientes para o sistema solo-planta no estudo de remineralização dos solos.

2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A princípio foi realizado a pesquisa bibliográfica sobre a geologia e cartografia da Faixa Araguaia (TO) em relatórios, dissertações, teses, projetos de iniciação científica e artigos em periódicos científicos que abordassem a Formação Xambioá, bem como a mineralogia do solo na região de mineração da empresa Minerax. Em seguida, passamos para a fase de análise laboratorial para identificação da composição mineralógica do micaxisto e do potencial para o uso da técnica de rochagem (remineralizador).

A pesquisa bibliográfica também consistiu na aquisição de informações a respeito do conceito rochagem e/ou remineralização dos solos, a fim de mostrar como essa técnica vem trazendo benefícios econômicos, substituindo os fertilizantes convencionais e de como o uso do micaxisto pode ser uma ótima opção no setor agromineral como remineralizador de solos.

De acordo com Theodoro *et al.* (2005), a rochagem se baseia no uso do pó de determinados tipos de rochas que contenham preferencialmente, quantidades apreciáveis de macro e micronutrientes, visando a remineralização do solo agrícola. Na definição de Van Straaten (2007), rochagem é a aplicação de rochas moídas no solo, técnica que visa recompor a fração de minerais intemperizáveis portadores de nutrientes importantes para as plantas. Por fim, foram utilizados os conceitos científicos aplicados nos trabalhos do Resende *et al.* (2005, 2006c); Machado *et al.* (2005); Castro *et al.* (2005); Theodoro *et al.* (2013), Batista *et al.* (2013); Souza *et al.* (2013, 2016); Doumer *et al.* (2016), no conhecimento do uso da rochagem e aplicação de remineralizadores no solo.

2.2 COLETA E TRATAMENTO DE AMOSTRAS

Foram coletadas três amostras no trabalho de cartografia geológica durante a execução da disciplina Prática Integrada de Campo em Petrologia (2018.4) ofertada pela Faculdade de Geologia da UFPA. As referidas amostras foram fragmentadas no próprio local,

em seguida foram acondicionadas em sacos plásticos com identificação apropriada, com a finalidade de diminuir o risco de contaminação da amostra e para a confecção de lâminas delgadas no laboratório de laminação da IG/UFGPA.

Para as análises de DRX foi selecionada apenas uma amostra, preparada de acordo com os requisitos estabelecidos pelo laboratório de DRX do IG-UFGPA, passando por um processo de cominuição (quebrar a rocha em partículas menores) até chegar na granulometria ideal para realização da análise. A preparação consistiu no moimento da amostra utilizando um almofariz de porcelana, chegando até a fração areia fina, e em seguida no moinho de ágata do Laboratório de Sedimentologia do IG/UFGPA, até atingir as condições granulométricas, tamanho silte (menor que 0,05 mm).

2.3 ANÁLISES PETROGRÁFICAS

Os estudos laboratoriais iniciaram-se com descrições macroscópica, seguida da descrição microscópica das amostras coletadas. A análise petrográfica foi realizado em microscópio óptico convencional do Laboratório de Petrografia do IG/UFGPA, permitindo o reconhecimento dos minerais que podem ou não disponibilizar macro e micronutrientes para o sistema solo-água-planta.

A descrição microscópica seguiu os critérios propostos por Yardley (1994) para a caracterização das rochas metamórficas. O estudo petroográfico possibilitou realizar uma estimativa modal de cada mineral presente na rocha (micaxisto), utilizando o método de contagem de pontos (contagem de 1000 pontos na objetiva de 25x), sendo os valores resultantes de uma quantificação volumétrica de cada mineral presente. A petrografia é importante para identificar a textura da rocha, mineralogia, tamanho dos minerais, grau de alteração e o reconhecimento da geração de minerais secundários, como argilominerais. Este estudo indica com razoável precisão quais minerais podem ter potencial para o fornecimento de nutrientes, além de melhor descrever os fatores que podem influencia na liberação destes elementos químicos ao meio ambiente.

2.4 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

As análises foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios-X da Universidade Federal do Pará (UFGPA). A DRX consiste no método preciso de identificação de fases cristalinas presentes na rocha, permitindo uma identificação sensível que usa o método do pó (rocha total), é uma técnica que requer pequena quantidade de amostra, podendo ser um simples cristal ou uma substância mono ou policristalina sob a forma de pó, revelando deste

modo boa parte do conteúdo mineralógico na rocha. O estudo foi feito por meio do Difratorômetro X'Pert MPD-PRO PANalytical, equipado com ânodo de Cu ($\lambda=1,5406$), no intervalo de 5° a 75° (2θ) e as informações foram tratadas nos *softwares* do próprio equipamento (*X'Pert dados coletor e X'Pert High Score*).

Nas análises de DRX, a identificação dos minerais consiste na comparação dos difratogramas das diferentes fases minerais com padrões já conhecidos, buscando a similaridade (identificação positiva). O software do equipamento trabalha com uma biblioteca de minerais (dados PDF-2 Powder Diffraction File do international Center on Diffraction Data -ICDD), onde cada mineral tem um padrão de difração único e próprio (Klug & Alexander 1966 e Cullity 1978 *apud* Porphírio *et al.* 2010). No final das análises, o software gera um difratograma como produto final para interpretação, registrando os principais picos de difração da associação mineral presente na rocha.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO DA FAIXA ARAGUAIA

Os micaxistos da Formação Xambioá estão inseridos na unidade de geotectônica descrita na literatura como Faixa ou Cinturão Araguaia. Esta unidade corresponde a um corpo orogénético de idade Neoproterozoica a Cambriana, formado durante o Evento Brasiliana/Pan-Africana (Hasui *et al.* 1977, Almeida *et al.* 1981 *apud* Alvarenga *et al.* 2000), apresenta mais de 1200km de extensão na direção N-S com largura média de 110 km na direção E-W. Limita-se ao norte com a Bacia Parnaíba; a oeste com o Cráton Amazônico, a sudoeste pela Bacia do Bananal e, ao sul e sudeste, pelo Lineamento Transbrasiliano (Figura 2).

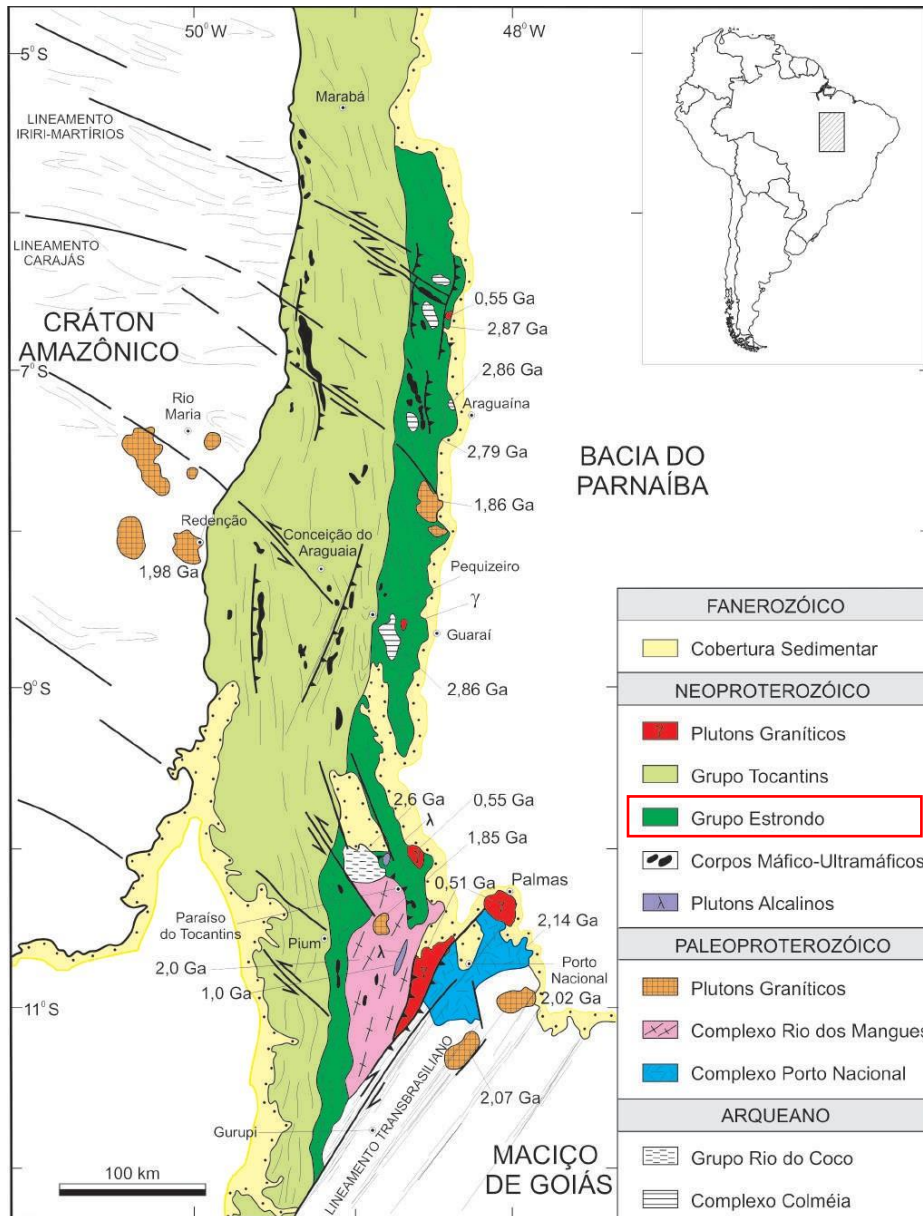


Figura 2 - Mapa geológico do Faixa Araguaia com indicação das idades das principais unidades litoestratigráficas, incluindo o embasamento e unidades do Neoproterozóico, destacando o Grupo Estrondo onde está inserida a Formação Xambioá (Gorayeb *et al.* 2008).

3.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DO EMBASAMENTO DA FAIXA ARAGUAIA

O embasamento da Faixa Araguaia é constituído por dois segmentos principais de rochas, ao norte afloram rochas ortognaisses arqueanas do Complexo Colmeia (2,85 Ga) e Gnaiss Cantão (1,85 Ga) do paleoproterozoico, sendo considerado como uma extensão do Cráton Amazônico para o leste. Na porção sul o embasamento é representado pelas rochas arqueanas do Grupo Rio do Coco (2,6 Ga), e por rochas do paleoproterozoicos do Complexo

Porto Nacional (2,1 Ga), Complexo Rio dos Mangues (2,05 Ga) e do Granito Serrote (1,86 Ga) (Gorayeb 1996, Moura & Gaudette 1999, Gorayeb *et al.* 2001 *apud* Arcanjo *et al.* 2013).

Na porção leste da Faixa Araguaia, aflora rochas do Complexo Colmeia, conjunto de ortognaisses de idade arqueana (2,85 Ga) de composição tonalítica a thondhjemítica, aflorando no núcleo de estruturas braquianticlinais como as de Colmeia, Lontra e Xambioá (Dall'Agnol *et al.* 1988, Moura & Gaudette 1999 *apud* Arcanjo *et al.* 2013). Segundo Costa (1980), as rochas do Complexo Colmeia apresentam metamorfismo da fácies anfibolito alto.

O Grupo Rio do Coco apresenta rochas vulcanosedimentares remanescente de um *greenstone belt* arqueano (Costa *et al.* 1983). O Complexo Porto Nacional apresenta rochas gnáissico-granulítico do paleoproterozoico (Gorayeb 1996). O Complexo Rio dos Mangues é uma unidade do paleoproterozoico de idade 2,1 a 2,0 Ga, que constitui rochas metassedimentares e metaígneas félsicas e máficas, que sofreram intenso metamorfismo em facie anfibolito médio (Moura & Sousa 1996).

IDADE	UNIDADES		LITOLOGIA	
NEOPROTEROZOÍCO	SUÍTE SANTA LUZIA, GRANITO RAMAL DO LONTRA E GRANODIORITO PRESIDENTE KENNEDY (0,55 Ga)		Granodioritos, monzogranitos e granitos pegmatóides	
	SUÍTE GABRÓICA XAMBICA (0,82 Ga)		Escapolita metagabros, metadiabásios e anfíbolitos	
	SUPERGRUPO BAIXO ARAGUAIA	GRUPO TOCANTINS	FORMAÇÃO COUTO MAGALHÃES	Filitos, metarcóseos, metassiltitos e metacalcários
			FORMAÇÃO PEQUIZEIRO	Clorita-muscovita-quartzo xistos, filitos e intercalações de quartzitos
	GRUPO ESTRONDO	FORMAÇÃO XAMBIOÁ	Micaxistos variados, grafita xisto, xistos feldspáticos, mármore, anfíbolitos, metamáficas e metaultramáficas	
		FORMAÇÃO MORRO DO CAMPO	Quartzitos puros e micáceos com intercalação de micaxisto	
	ASSOCIAÇÃO MÁFICA-ULTRAMÁFICA		Basaltos, peridotitos, serpentinitos, esteatitos, talco xistos e clorita xistos	
SUÍTE SERRA DA ESTRELA (1,0 Ga)		Nefelina sienito gnaisses		
PALEOPROTEROZOÍCO	COMPLEXO RIO DOS MANGUES (2,0 Ga)		Gnaisses tonalíticos, cálciossilicáticos, anfíbolitos, quartzitos e micaxistos	
ARQUEANO	GRUPO RIO DO COCO (2,6 Ga)		Sequência metavulcanossedimentar, metabasitos e metaultramáficas	
	COMPLEXO COLMEIA (2,85 Ga)		Ortognaisses de composição tonalítica a trondhjémítica	

Figura 3 - Coluna litroestratigráfica geral da Faixa Araguaia destacando o Supergrupo Baixo Araguaia, onde estão inseridos o Grupo Estrondo e a Formação Xambioá. Modificado de Alvarenga *et al.* (2000) e Gorayeb *et al.* (2008).

O Granito Serrote é um plúton granítico de idade paleoproterozoica intrusivo no Complexo Rio dos Mangues (Gorayeb 1996). O Gnaiss Cantão (1,85 Ga) é composto por rochas gnaisses a graníticas, que truncam o Complexo Colmeia durante o paleoproterozoico (Moura & Gaudette 1993).

Suíte Serra da Estrela e Suíte Monte Santo, são rochas magmáticas alcalinas e apresentam uma idade Pb-Pb em zircão de 1.0 Ga (Arcanjo & Moura 2000), Suíte Ofiolítica quatipuru é representado por rochas máficas e ultramáficas metamorfasadas em baixo grau metamórfico (Paixão 2009).

3.2 SUPERGRUPO BAIXO ARAGUAIA

A Faixa Araguaia é constituída por rochas metamórficas e estão reunidas no Supergrupo Baixo Araguaia (Abreu 1978) sendo subdividido nos grupos Estrondo, com a formações Morro do Campo e Xambioá, e o grupo Tocantins, formações Pequizeiro e Couto Magalhães.

3.2.1 Grupo Estrondo

Sua unidade basal é representada pela Formação Morro do Campo, é composto predominante por quartzitos puros e micáceos com cristais de cianita e magnetita, além de metaconglomerados com intercalações de biotita xistos, quartzo micaxistos e xisto grafitoso (Abreu 1978).

A Formação Xambioá representa o topo do grupo e é constituído por micaxistos variado como: grafita xisto, xistos feldspáticos, granada xistos, bem como mármore e anfíbolitos, rochas metamáficas e metaultramáficas (Abreu 1978, Gorayeb *et al.* 2008).

3.2.2 Grupo Tocantins

A Formação Pequizeiro é a base do Grupo Tocantins e está colocada tectonicamente sobre a Formação Xambioá, a Formação Couto Magalhães está localizado na parte superior. O Grupo Tocantins apresenta uma ampla distribuição na porção central e oeste da Faixa Araguaia.

Primeiramente proposto por Hasui *et al.* (1977) a Formação Pequizeiro é constituída por clorita xisto, quartzo-muscovita xistos, clorita-muscovita-quartzo xisto, com intercalações subordinadas de magnetita-muscovita filitos, quartzitos e talco xisto. Apresenta uma foliação bem penetrativa, marcado pela xistosidade, com trend N-S, NNW ou NNE e mergulhos que variáveis para leste, a formação apresenta condições de metamorfismo na fácies xisto verde (Gorayeb 1981).

Definida também por Hasui *et al.* (1977), a Formação Couto Magalhães compõe um conjunto de rochas de baixo grau metamórfico representado por ardósias, metasiltitos, lentes de quartzitos, filitos e metarcósios. A formação apresenta estruturas sedimentares primarias

preservadas como estratificação paralela e cruzadas. Em geral são rochas que variam do anquimetamorfismo a fácies xisto verde (Gorayeb *et al.* 2008).

3.3 GRANITÓIDES

A Suíte Lajedo é composta por rochas de natureza monzograníticas e sienogranito metaluminoso a levemente peraluminoso, dados em Pb-Pb monocristais de zircão revelem uma idade média de cristalização em 547 e 552 Ma (Gorayeb 2013). O Granito Ramal é um pequeno plúton granítico, são rochas monzograníticas e as vezes granodioríticas, utilizando técnicas de evaporação de Pb em monocristais de zircão, indicam uma idade média de 549 Ma interpretada como idade mínima de cristalização (Alves 2006).

O Granodiorito Presidente Kennedy é constituído por granodioritos e monzogranitos, e são intrusivos nos micaxistos do Grupo Estrondo, dados Pb-Pb em monocristais de zircão indicam uma idade média de 539, considerada a idade mínima de cristalização para o plúton (Gorayeb *et al.* 2019). Por fim, o Granito Santa Luzia é descrito como granodioritos, monzogranitos e granitos pegmatíticos peraluminosos (Lamarão & Kotschoubey 1996). Foram obtidas idades U-Pb SHRIMP em núcleos de zircão variando de 500 a 1500 Ma, bem como idades na borda de 528 Ma (Moura *et al.* 2008).

4 GEOLOGIA DA ÁREA DA EMPRESA MINERAX

A área de estudo do presente trabalho está localizada na Folha SB.22-Z-B (Xambioá) escala 1:250.000, no norte do Estado do Tocantins, dentro da área de extração mineral da empresa Minerax. Corresponde a porção mais oeste da Faixa Araguaia e representa rochas com mais baixo grau metamórfico que atingiu até a fácies xisto verde inferior.

A Formação Xambioá representa a base do Grupo Estrondo, são rochas xistosas intercaladas com mármore, quartzitos e metaconglomerados. É caracterizado por uma superfície com suaves ondulações em extensos lajeiros quilométricos.

A seguir será descrito com mais embasamento o estudo da Formação Xambioá em todo seu caráter geológico e a mineralogia do solo da região, além de um mapa geológico (Figura 4) e de solos (Figura 5) em escala reduzida da área.

4.1 FORMAÇÃO XAMBIOÁ

A Formação Xambioá foi denominada por Abreu (1978) ao descrever um espesso pacote rochoso de xisto sobre os litotipos da Formação Morro do Campo na estrada Xambioá-Vanderlândia (TO), além disso, diversos autores estudaram a Formação Xambioá, destacando Silva (1980), Macambira (1983), Santos *et al.* (1984) e Montalvão (1985), (Souza & Moreton 2001).

Segundo a revisão da Folha Xambioá realizada por Souza & Moreton (2001), a Formação Xambioá ocorre na região norte da Faixa Araguaia, na parte nordeste envolve-se com as rochas da Formação Morro do Campo, fazendo contato normais e tectônicos, além disso, é recoberto discordantemente por sedimentos da Bacia do Parnaíba. Com a Formação Piquizeiro, apresenta um contato tectônico devido a reativações de falhas normais no mesozóico, ocasionando a formação de *graben* que abrigaram a sedimentação da Bacia do Parnaíba e da Formação Rio das Barreiras.

A Formação Xambioá apresenta uma grande distribuição ao longo da Faixa Araguaia e é uma unidade que atingiu condições de baixo metamorfismo. Idades K/Ar obtidas por Macambira (1983) em biotita e muscovita provenientes de xistos e hornblenda de anfibolitos mostram que o metamorfismo que afetou este grupo ocorreu entre 518 e 565 Ma.

As rochas dessa unidade são representadas, principalmente, por uma variedade de xistos, tais como muscovita xistos, muscovita-biotita-quartzo xistos, granada micaxisto, xistos feldspáticos, mármore, anfibolitos e talco xistos, são variedades que ocorrem intercalados e são fortemente estruturadas com xistosidade e em muitos casos apresentadas bandamentos

milimétricos com alternância de leitos quartzo-feldspáticos e micáceos (Gorayeb 2008, Pinheiro 2016).

Os micaxistos são as rochas mais abundantes da Formação Xambioá e apresentam cores variando de cinza clara ao cinza escuro, dependendo da abundância relativa entre a biotita e muscovita, estes minerais apresentam-se amplamente distribuídas nas rochas, seguindo uma orientação preferencial, definindo texturas lepidoblásticas (Pinheiro 2016). Os xistos feldspáticos são encontrados próximo do Município de Xambioá, apresenta uma coloração cinza claro a escuro, textura porfiroblásticas e lepidoblástica, e uma granulação média, os minerais essenciais são biotita, muscovita, quartzo e feldspatos (Gorayeb 2019).

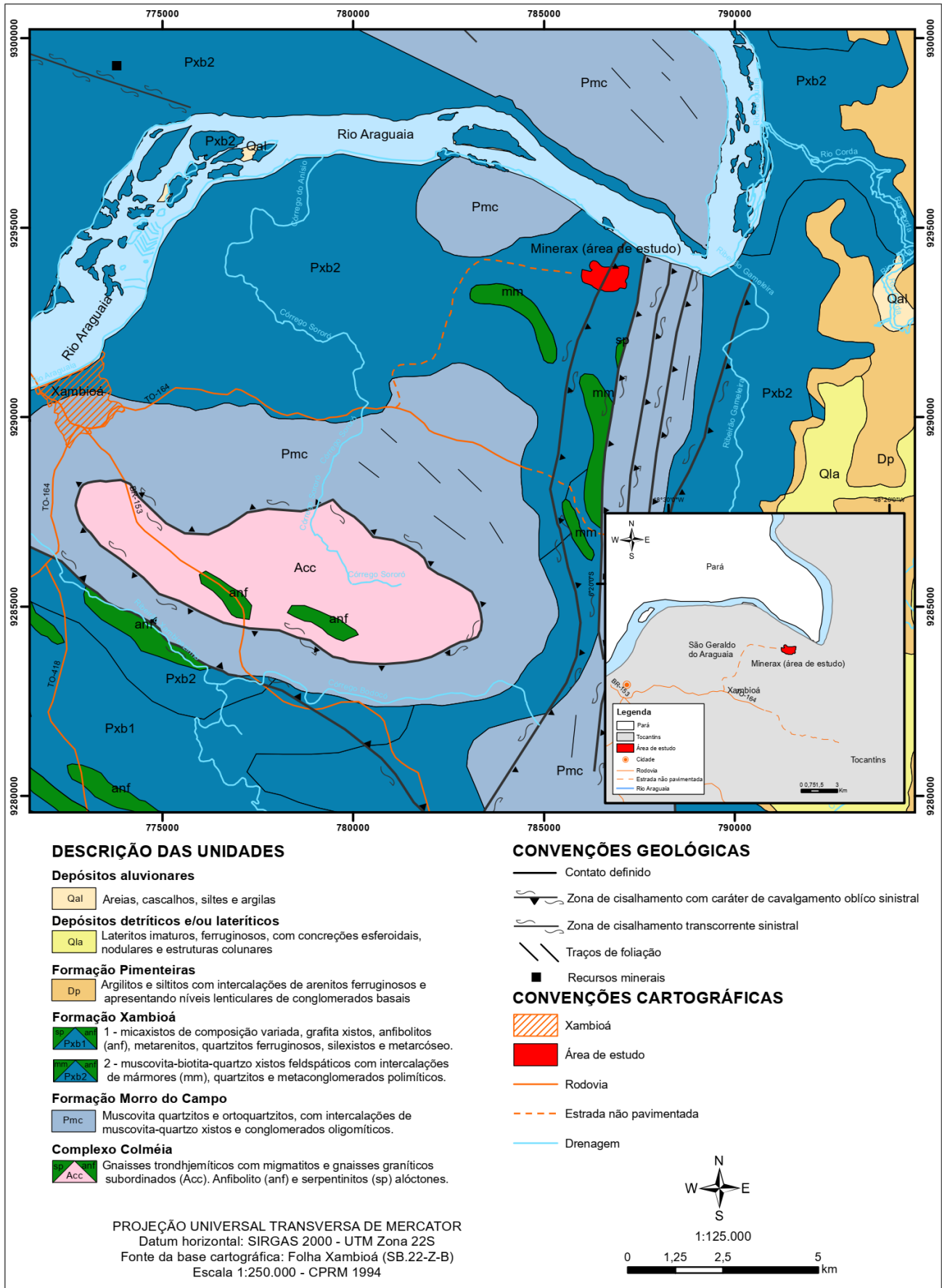


Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo e adjacências, Escala 1:125.000 (Modificado da Folha Xambioá SB.22-Z-B - Escala 1:250.000 – CPRM 1997).

4.2 MINERALOGIA DO SOLO DA MINERAX

O solo da região de estudo é representado basicamente por Argissolo vermelho-amarelo distrófico (PVAd31) e Neossolo litólico distrófico (RLd6) como são vistos na Figura 5 (IBGE 2019). O argissolo vermelho-amarelo distrófico apresenta uma textura argilosa, variando de muito cascalhenta a cascalhenta, sua mineralogia é constituída por caulinita, gibbsita e traços de mica, além da presença de alguns óxidos (Campos *et al.* 2011).

A presença dos óxidos de ferro (hematita) e do hidróxido de alumínio (gibbsita), assim como dos óxidos de titânio (ilmenita), é comum em solos de ambientes tropicais, em razão das condições de intensa lixiviação, sendo um desses óxidos de grande importância no pedossistema, conforme a litologia da rocha de origem, assim como os mecanismos de pedogênese (Ferreira *et al.* 2003 *apud* Campos *et al.* 2011).

Além disso, os argissolos em geral apresentam acúmulo de argila em profundidade devido a mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo, apresenta baixa fertilidade natural e acidez elevada devido aos altos teores de gibbsita (Embrapa 2006).

O neossolo litólico distrófico é um solo recente e raso sobre a rocha, são encontrados principalmente em condições de topografia acidentada, onde há muito afloramento de rochas, com profundidade em torno de 50 cm, a textura do solo recebe forte influência da rocha de origem e por ser um solo raso, é comum a ocorrência de cascalho e calhaus, caráter pedregoso e rochoso na superfície do terreno e sua mineralogia varia conforme a litologia, apresenta baixa atividade de troca catiônica e baixa concentração de nutrientes prontamente disponíveis para absorção do plantio (Embrapa 2006).

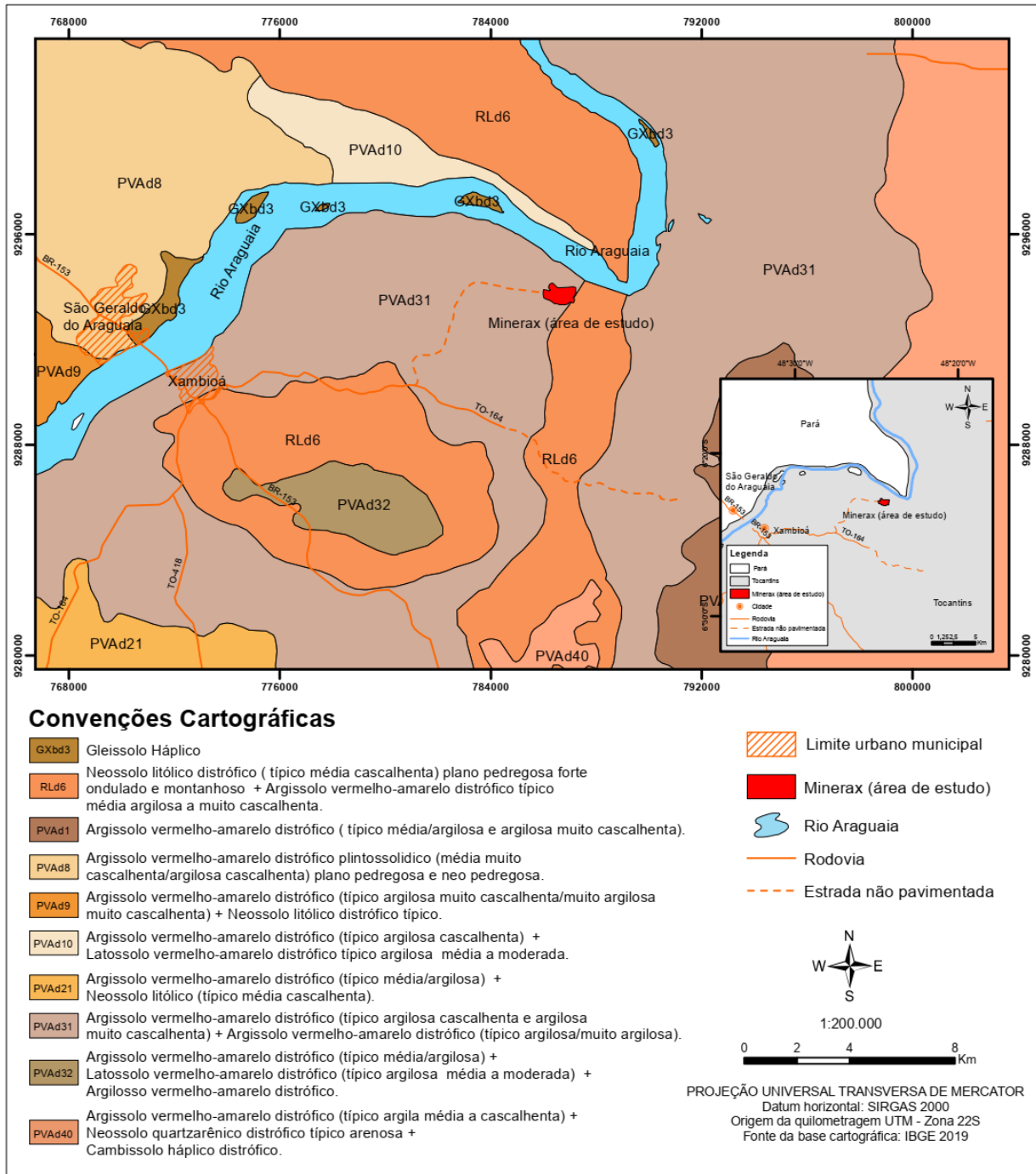


Figura 5 – Mapa de classificação de solo da área de estudo e adjacências. (Modificado do IBGE 2019).

5 BREVE HISTÓRICO DA GEO CULTURA, ROCHAGEM E/OU REMINERALIZAÇÃO DO SOLO NO BRASIL

A produção agrícola cresceu muito nos últimos anos, de forma rápida e efetiva, principalmente no uso de fertilizantes convencionais, assim como nos defensivos agrícolas ou transgênicos. Cerca de 71% dos fertilizantes utilizados no Brasil são oriundos de fontes de importação, compostas, principalmente, de Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), de elevada concentração e alta solubilidade (Rodrigues 2009). A Tabela 1 mostra a quantidade de fertilizantes importados, a produção nacional de fertilizantes e a quantidade de exportações de fertilizantes formulados a base de NPK.

No Brasil os preços dos fertilizantes passam por variações devido a constante oscilação do dólar e do elevado custo de transporte. Assim, a carência de recursos em determinados setores rurais, formados por pequenos agricultores, provocou o início das pesquisas na busca por alternativas mais viáveis para o setor agrícola, incluindo técnicas de rochagem (Lapido-Loureiro & Nascimento 2009).

Diante da oscilação econômica do Brasil e sua dependência na importação de insumos agrícolas, a remineralização dos solos tornou-se uma opção viável como alternativa na produção rural no uso de NPK, pois o Brasil é um país que apresenta uma grande variedade de unidades litológicas que justifica viabilizar o uso de diferentes tipos de pó de rocha em diversas regiões (Martins & Theodoro 2010).

Tabela 1 - Indicadores do mercado de fertilizantes em toneladas, de 2016 a 2019

Ano	Importação de fertilizantes intermediários (t)	Produção nacional de fertilizantes intermediários (t)	Principais exportações de fertilizantes e formulações NPK (t)
2016	22.374.670	8.248.408	496.480
2017	24.108.289	7.570.865	297.967
2018	24.867.854	7.444.650	315.923
2019	27.124.275	6.241.353	237.212

Fonte: (ANDA 2020).

Diversos estudos e ações de pesquisa com rochas adequadas para a remineralização estão em desenvolvimento no Brasil, essa linha de pesquisa no país iniciou na década de 1950, em Minas Gerais, pelos pesquisadores Josué Guimarães e Vlademir Ilchenko. Posteriormente, a partir de 1970, o Professor Othon Leonardos iniciou os primeiros trabalhos

neste tema na Universidade de Brasília (UnB) e assim as pesquisas ganharam maior proporção devido a necessidade de fornecimento de K e outros nutrientes para o agronegócio e alternativas para a obtenção de fertilizantes (Resende *et al.* 2006c).

A continuação dos trabalhos do Professor Othon Leonardos foi dada pela Professora Suzi Huff Theodoro que dedicou sua pesquisa ao tema rochagem e defendeu sua tese de doutorado em 2000 na UnB, cujo tema foi “a fertilização da Terra pela Terra: Uma Alternativa de Sustentabilidade para o Pequeno Produtor Rural”. Em seus trabalhos de pesquisa, a Professora Suzi H. Theodoro demonstra que a tecnologia de rochagem é uma prática que induz a fertilização da terra com a própria terra, viabilizando o equilíbrio de todo o agroecossistema. As pesquisas iniciadas e desenvolvidas na UnB corroboram para que essa tecnologia fosse difundida pelo Brasil nos últimos anos, tornando-se importante para o Brasil, um país que é detentor de uma imensa geodiversidade.

A partir destes estudos iniciais, a linha de pesquisa sobre rochagem aumentou consideravelmente. No ano de 2003 foi criada uma rede interinstitucional de pesquisa, nomeada de Rede Agri-Rocha, coordenado pela Embrapa, com o objetivo de avançar nos estudos e conhecimentos sobre o tema. O principal foco da Rede Agri-Rocha é desenvolver atividades e experimentos em rochas das mais diversas regiões do país, ampliando a possibilidade e a viabilidade econômica desses corpos rochosos como fontes de K, principalmente (Resende *et al.* 2006c).

Segundo Leonardos *et al.* (1976), a rochagem inicia do princípio de diferenciação de fontes de nutrientes, criando novas alternativas de suprimento, adicionando o pó de rochas e/ou minerais ao solo, podendo ser considerada como um tipo de remineralização. O pó de rocha tem o objetivo de rejuvenescer solos pobres ou lixiviados, enquadrando-se, basicamente, na busca do equilíbrio da fertilidade do solo, na produtividade sustentável e conservação dos recursos naturais.

As pesquisas realizadas por Theodoro *et al.* (2000, 2009), que tratam da utilização de pó de rocha em determinadas culturas, demonstram que existe uma expressiva economia dos custos, cerca de 60% a 70%, comparado com os fertilizantes convencionais. Dessa forma, entende-se que o Brasil possui uma imensa disponibilidade de fontes de extração de rochas (basaltos, kamafugitos, carbonatitos, fonolitos, serpentinitos, xistos, filitos, margas e alguns tipos de granitos e gnaisses, etc.) que podem impactar no uso de rochas moídas para o manejo da fertilidade do solo.

O uso do pó da rocha pretende reverter o uso excessivo de fertilizantes solúveis, além de apresentar grande potencial de sustentabilidade, permite o aproveitamento de resíduos da mineração, reduz problemas ambientais causados pelo uso indiscriminado de fertilizantes químicos, produz alimentos de melhor qualidade e reduz os custos do agronegócio (Silveira 2016).

De acordo com Theodoro *et al.* (2010), a moagem da rocha é o marco inicial para facilitar a disponibilização dos nutrientes. A diminuição das partículas causa o aumento da superfície de ação dos agentes intempéricos (físicos, químicos e biológicos), aumentando a solubilidade mineral. Os autores enfatizam que o uso do pó de rocha nos solos intemperizados facilita sua remineralização, isto se deve a grande quantidade de macro e micronutrientes que foram perdidos pelos solos ao longo dos processos intempéricos ou antrópicos (Theodoro *et al.* 2013).

A solubilidade é definida como relação direta entre a liberação de nutrientes e velocidade do intemperismo. Este processo pode ser acelerado por meio de rápidas mudanças físicas que aumente a superfície de contato dos minerais (moagem) e mudanças químicas, como por exemplo, variação térmica e acidulação dos minerais (Van Straaten 2006). Além disso, o processo de formações e cristalização das rochas, podemos dizer que quanto maior é a sua temperatura de formação, mais fácil será a sua alteração ou desgaste (intemperismo). Este fator é considerado fundamental, pois as rochas mais ricas em nutrientes são as mais propícias ao intemperismo (Figura 6) (Theodora 2020).

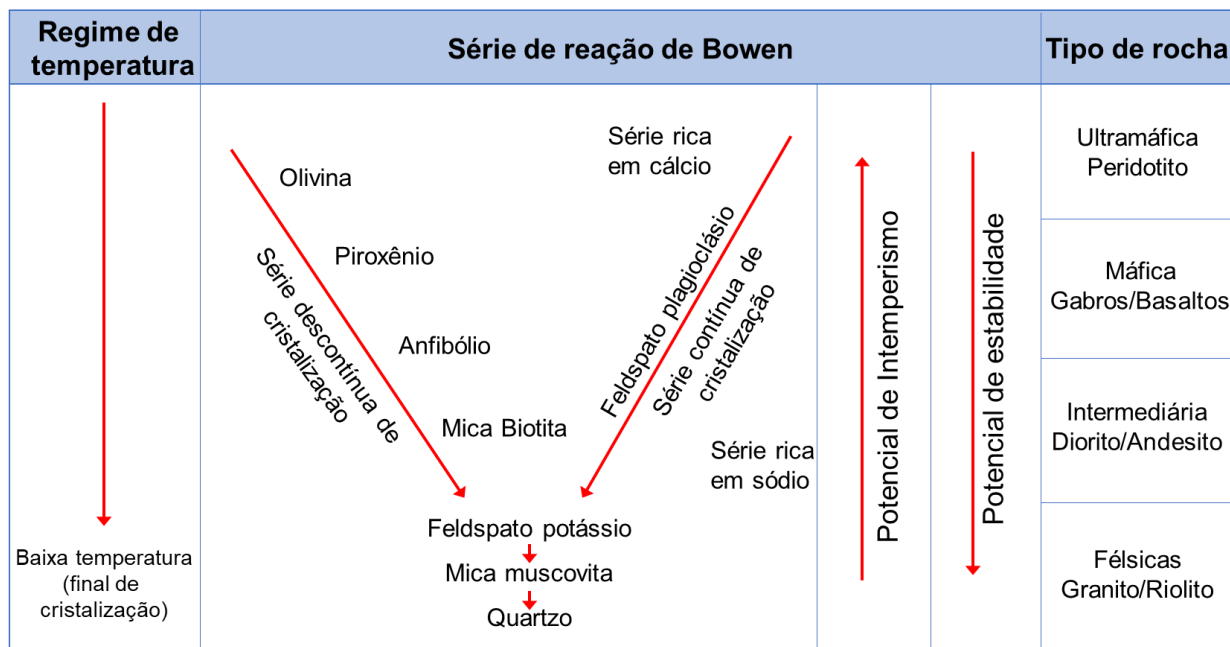


Figura 6 - Esquema que resume a estabilidade dos principais minerais e rochas ao intemperismo. Série de Bowen (Lepsch 2011, modificado de Theodoro 2020).

Da mesma forma, Melamed *et al.* (2009) afirma que o intemperismo promover o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), devido à formação de novos minerais de argila durante seu processo de alteração, e posteriormente disponibilizando macro e micronutrientes para o solo.

As diversas rochas utilizadas para o uso da rochagem são em sua maioria de natureza silicáticas e apresentam ampla distribuição pelo território nacional. Entre estas rochas, existe grande interesse naquelas que apresentam minerais do tipo flogopita, biotita ou feldspatóides, considerando a presença do elemento K em sua composição química, além de outros macronutrientes como Ca, alguns micronutrientes como Cu e Zn e também por estas rochas apresentarem maior solubilidade (Martins *et al.* 2008).

Existem estudos que mostram os benefícios com o uso de minerais na remineralização, como a retenção de água no solo e o aumento da produção de matéria orgânica, que conseqüentemente, desenvolve uma maior resistência das plantas a fatores climáticos (Resende *et al.* 2006a). Podemos dizer que a técnica de rochagem tem a possibilidade de interação de dois grandes setores econômico no Brasil, a mineração e a agricultura, que, tradicionalmente, não têm ligação e que são considerados, de forma geral, como agentes de degradação ambiental (Theodoro *et al.* 2013).

Existe uma grande viabilidade agronômica e econômica na técnica de rochagem ou remineralização dos solos, pode reduzir a ocorrência da agricultura migratória e ser uma excelente alternativa para os pequenos produtores, por serem técnicas mais acessíveis e de menor custo (Theodoro & Leonardos 2006). Mas para que o uso do pó de rocha seja possível, é de fundamental importância que o local de aplicação seja próximo da fonte dos agrominerais. Theodoro & Rocha (2005) sugerem que a distância, do local de aplicação e origem, não deve ultrapassar dos 500 km, pois isto comprometeria a viabilidade econômica da rochagem.

Além disso, a técnica de rochagem avançou em termos jurídicos no Brasil com a publicação da lei de remineralizadores de solo, nº 12.890 de 10 de dezembro de 2013. Nesta legislação foram incluídos os remineralizadores como uma categoria de insumo agrícola, sendo uma alternativa de fertilização de solos para os produtores rurais, diminuindo a dependência de importação desses insumos. Ademais, foi publicada em 14 de março de 2016 a Instrução Normativa nº 5 do MAPA que define parâmetros de análise e de qualidade de remineralizadores de solo a serem registrados no Brasil.

6 ROCHAGEM E REMINALIZAÇÃO DOS SOLOS COM MICAXISTOS

O xisto é uma rocha metamórfica que apresenta em sua mineralogia essencial cerca de 30% de filossilicatos (podendo ser clorita, muscovita, talco, biotita e etc..), e menos de 20% de feldspatos (feldspato potássico e/ou plagioclásio) e quartzo em sua composição. Os minerais acessórios são principalmente hematita, apatita, pirita, titanita e carbonatos (Winge *et al.* 2001).

O xisto apresenta em sua mineralogia vários indicadores como potencial para o uso da rochagem, principalmente na solubilidade dos minerais e da capacidade de liberação de K, sendo este um fator extremamente importante na escolha de pó de rochas para aplicação direta ao solo. Os minerais portadores de K em xistos, em geral, são flogopita, biotita e os feldspatos potássicos, os quais apresentam elevada solubilidade entre os silicatos (Nascimento & Lapido-Loureiro 2004).

A biotita e a flogopita, dentre os minerais silicatados, apresentam um enorme potencial para a extração de K, devido ao seu considerável teor de K_2O e a ocorrência abundante nas rochas. Além do mais, os feldspatos potássicos são considerados fontes potenciais de potássio, tanto na forma de sais, como na forma de termofosfatos ou na aplicação direta ao solo, sendo o ortoclásio e o microclínio os minerais principais (Nascimento & Lapido-Loureiro 2004).

Os primeiros estudos a respeito do uso do xisto, como remineralizador de solo, teve início com trabalhos preliminares de pesquisa da Universidade de Brasília e Embrapa que tinham como objetivos a identificação e caracterização de rochas com potencial para rochagem. Biotita xisto foi uma das primeiras rochas estudadas na fase preliminar das pesquisas, por apresentar uma quantidade razoável de minerais como biotita ou flogopita, passando a ser considerada uma rocha promissora na aplicação direta do pó de rocha no solo, com fácil liberação de K e grande solubilidade, além disso, outros minerais presentes em sua composição podem fornecer outros nutrientes e apresentar efeitos alcalinizante, como é o caso da calcita (Resende *et al.* 2005, Machado *et al.* 2005).

Estudos realizados por Resende *et al.* (2006c), em casa-de-vegetação, demonstram que rocha do tipo biotita xisto libera quantidade significativa de K, atendendo as exigências das culturas de milho e soja, já nos primeiros cultivos. Além disso, uma taxa maior de sucesso de se forem conduzidos em solos arenosos, onde a lixiviação de K e os desequilíbrios

nutricionais são problemas mais frequentes. Castro *et al.* (2005) também realizaram estudos em casa-de-vegetação, utilizando cultura de girassol e soja, e verificaram que a biotita-flogopita xisto apresentou eficiência comparável à do KCl.

O experimento implantado por Theodoro *et al.* (2013) utilizou cinco tipos de rochas para o uso na rochagem em culturas diferentes, uma delas foi o uso de um micaxisto, trazendo resultados extremamente positivos quando se usa o pó desta rocha em culturas de alho, feijão e quiabo.

Já Batista *et al.* (2013) realizou experimentos usando duas granulometrias distintas do pó de micaxisto, em cultura de cana de açúcar, no Município de Jataí-GO. A primeira granulometria apresenta 80% do total de massa na fração menor que 0,3 mm, foi denominado de FMX (fino de micaxisto), a segunda granulometria foi denominado AMX (areia de micaxisto) possui 25% do total de massa na fração menor que 0,5 mm, e tem ampla distribuição nas outras faixas granulométricas. O FMX mostrou um prolongamento do período vegetativo e enchimento de colmos, contribuindo com a produtividade, qualidade da cultura e ATR (Açúcar Totais Recuperáveis).

O uso do AMX apresentou valores inferiores de ATR comparado ao FMX, o resultado pode estar relacionado a faixa granulométrica, diminuindo conseqüentemente a solubilidade dos nutrientes. A aplicação de FMX na cultura do açúcar ainda proporcionou incremento produtivo de ATR/ha, representando um elevado ganho econômico (Batista *et al.* 2013).

Souza *et al.* (2013), por sua vez, demonstraram resultados promissores com o uso do pó de biotita xisto, vindo do resíduo de um garimpo de esmeraldas em Monte Santo-TO em cultura de cana de açúcar. A metodologia envolveu duas doses crescentes de pó de rocha (60, 120 e 240 Kg.ha⁻¹ de K₂O) em substituição as fontes convencionais de potássio (KCl). Os resultados mostraram que já na menor dose de pó de rocha (60 Kg.ha⁻¹) o cultivo apresenta a mesma produção (t. ha⁻¹) obtidas por fontes convencional, assim essa estratégia de complementação resultou em ganhos de produção da ordem de 20%.

De modo geral, o uso do micaxisto como remineralizador de solo, demonstra resultados benéficos significantes sobre a nutrição, crescimento e produção da mandioca, seja em substituição de outros tipos de fertilizantes ou na complementação as fontes convencionais, sendo que nesta última agindo como condicionador de solo por ter elevado a eficácia da fonte convencional solúvel (KCl) (Souza *et al.* 2016).

No ano de 2010, a Embrapa iniciou o Projeto Xisto Agrícola, destinado no aproveitamento de coprodutos do processamento do folhelho pirobetuminoso (xisto), executado pela Petrobras-Six, em São Mateus do Sul-PR. Neste projeto os derivados são a água de xisto (AX), obtida a partir da vaporização da água estrutural da rocha-mãe, utilizado como fertilizantes foliares; os finos de xisto (FX), tendo potencial na agricultura e em outros setores, o calcário de xisto (CX), que pode atuar como corretivo de acidez do solo, e o xisto retornado (XR), que tem sido testado na produção de remineralizadores de solo. A grande quantidade desses coprodutos e sua composição química e mineralógica tornam promissor seu uso como remineralizadores de solo (Doumer *et al.* 2016).

Considerando os efeitos de curto prazo (um ou dois cultivos em condições de casa-de-vegetação), o micaxisto tem apresentado em torno de, pelo menos, 50% de eficácia agrônômica em relação a fontes solúveis (KCl). Desse modo, esta rocha moída pode ser empregada como fonte de liberação gradual de nutrientes, sendo uma característica desejável no tempo de duração do fertilizante e o menor risco de perdas, comparativamente aos adubos de alta solubilidade (Martins *et al.* 2008).

Por fim, vale ressaltar aqui, que o micaxisto extraído do Município de Aparecida de Goiania-GO, dentro da área de exploração da Empresa Tratto Agronegócios do Grupo Actualpar, é o primeiro remineralizador de solos registrado no MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). É um produto aprovado pela Associação de Certificação Instituto Biodinâmico (IBD) para o uso na produção orgânica.

7 POTENCIAL DO PÓ DE ROCHA DO MICAXISTO NO USO DE ROCHAGEM E/OU REMINALIZAÇÃO DOS SOLOS PARA DIFERENTES CULTURAS

7.1 FEIJÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) tornou-se um dos alimentos mais consumidos pelos humanos, sendo um dos mais importantes componentes da dieta em países em desenvolvimento (Bitocchi *et al.* 2017). O Brasil conta com duas variedades de feijão, o primeiro já citado anteriormente, conhecido como feijão-comum e o segundo *Vigna unguiculata*, mais conhecido como feijão-caupi, muito cultivado no nordeste brasileiro e na região amazônica (Costa *et al.* 2017).

O cultivo do feijão-comum é realizado por diversos tipos de produtores, em diversas localidades no Brasil que usam diferentes níveis de tecnológicos, dentre os produtores, a agricultura familiar se destaca como o grande responsável pela produção de feijão do país (Silva & Wander 2013). O mercado do feijão-caupi, por exemplo, gira em torno da produção de grãos secos ou imaturos, colhido e usado para o consumo ou comercializado na forma de vagem ou grãos frescos debulhados (Andrade *et al.* 2010).

Nos últimos 20 anos, a cultura do feijão (feijão-comum + feijão-caupi) teve grandes modificações, sobressaindo o aumento da produtividade, principalmente na terceira safra, e a concentração da produção em regiões mais favorecidas. A 1ª safra de feijão comum representa 52,3% da produção de 2,7 milhões de toneladas colhidas em 1 hectare (Silva & Wander 2013).

Segundo dados obtidos pelo Conab (2020), a produção total de feijão foi de 2928,5 mil hectares, com uma produção cercada a 3120,3 toneladas (Tabela 2). A Conab estimou para a safra 2019/2020 uma produção de 3,22 milhões de toneladas, volume 6,8% superior ao produzido na safra anterior, quando a demanda foi em mais ou menos 3,15 milhões de toneladas, quantidade 3,3% superior ao da temporada passada. Assim diante dos dados levantados é justo considerar a busca em formas de melhorar o cultivo dessa cultura, acrescentando os principais nutrientes que o feijão necessita, pois, a nutrição adequada é o meio rápido e menos oneroso para aumentar a produtividade da cultura, sendo que a melhor qualidade é alcançada considerando o equilíbrio no fornecimento de macro e micronutrientes que atuam no metabolismo vegetal (Santos *et al.* 2007 *apud* Bezerra Neto *et al.* 2015).

Tabela 2 - Oferta e demanda de feijão da safra de 2015/2016 a 2020/2021 no Brasil

Ano	Consumo	Exportação	Estoque final	Produção
2015/2016	56.319	18.847	5.231	66.530
2016/2017	57.337	30.813	15.876	97.842
2017/2018	59.162	23.742	14.582	80.709
2018/2019	64.957	41.074	10.189	100.042
2019/2020	68.662	34.892	10.602	102.515
2020/2021	72.149	35.000	9.934	105.481

Fonte: (Conab 2020).

Malavolta (2006) afirma que o nitrogênio, dentre os macronutrientes, é o que tem efeito mais rápido sobre o crescimento vegetal do feijão, responsável pela cor verde escura das folhas, promove o desenvolvimento do sistema radicular, melhorando a absorção de outros nutrientes.

O Fósforo coordena a respiração da planta, a divisão celular e a formação de proteínas, e ATP (trifosfato de adenosina) que é a principal fonte de energia do feijão, o potássio (K) atua regulando a transpiração e entrada de CO₂, na fotossíntese, absorção da água do solo e etc., o cálcio atua no desenvolvimento das raízes, estabilização da parede celular e das membranas da célula vegetal (Marschner 2012 *apud* Bezerra Neto *et al.* 2015).

Segundo Barbieri *et al.* (2013), é de grande importância uma adubação equilibrada de nutrientes à cultura de feijão, aumenta o desenvolvimento inicial, o vigor, qualidade fisiológica das sementes produzidas para as próximas safras e a sua produtividade. As principais recomendações são doses de corretivos, como calcário, fertilizantes minerais solúveis (fontes de NPK) ou remineralizadores de solo (Vale *et al.* 2017).

7.2 MILHO

O milho (*Zea mays L.*) é uma espécie cultivada em muitas partes do mundo, sua grande adaptabilidade, representadas por vários genótipos, permite seu cultivo desde o Equador até ao limite das terras temperadas e desde o nível do mar até altitudes superiores a 3600 metros, encontrando-se em climas tropicais, subtropicais e temperados (Barros & Calado 2014).

A cultura do milho se tornou uma alternativa de grande valor econômico para o produtor, devido ao bom preço de mercado, à demanda pelo produto *in natura* e pela indústria de conservas alimentícias, além dos valores, agregados como mão-de-obra familiar,

movimentação do comércio, transporte, indústria caseira e de outras atividades ligadas à agricultura familiar (Pereira Filho 2002). Porém sua maior utilização é na alimentação animal, por ser rico em carboidratos solúveis, fonte de energia (Pereira *et al.* 2012).

O milho é o principal macro ingrediente para a produção de rações, dada a importância na competitividade do mercado brasileiro de carnes, aumentando gradativamente a produção dos grãos (especialmente na segunda safra). A cadeia produtiva do milho é uma das mais importantes do agronegócio brasileiro, o qual, considerando apenas a produção primária, corresponde por aproximadamente 37% da produção nacional de grãos (Caldarelli & Bacchi 2010).

De acordo com dados da Conab (2009), a área plantada com milho expandiu 4,61 milhões de hectares entre 1989/1990 a 2008/2009. Em 2014, o país atingiu mais de 15 milhões de hectares no plantio de milho, sendo os estados do Mato Grosso, Paraná e Mato Grosso do Sul representando cerca de 48,50% da área total (Costa *et al.* 2017). Na tabela 3 é possível visualizar os dados mais recentes da evolução da área plantada e da produção nacional.

Os principais nutrientes absorvidos em maior quantidade pela cultura do milho é o potássio (K), onde aumenta a taxa fotossintética, melhorando o crescimento e resistência da planta em ambiente secos, o fósforo (P) que estimula o desenvolvimento radicular, incrementa a resistência mecânica do caule e influencia a floração e fecundação, e o nitrogênio (N) onde aumenta o teor de proteína do grão (Barros & Calado 2014).

O nitrogênio é um nutriente muito solúvel e por isso muito móvel no solo, podendo facilmente ser lixiviação ao longo do substrato e saindo para fora da ação das raízes, diferente do primeiro o fósforo é um nutriente pouco solúvel e que pode ser retido facilmente no solo, ficando indisponível para o milho, o potássio é absorvido em forma de íons K^+ , sofrendo menos lavagem que o N e mais que o P, em média apenas 40% do total disponível no solo é absorvido pelo milho (Barros & Calado 2014).

Tabela 3 - Evolução da área plantada e produção nacional da safra de milho de 2017/2018 até 2020/2021

Ano	Área plantada (1000 ha)	Produção (1000 t)
2017/2018	16.636	82.500
2018/2019	17.493	100.000
2019/2020	18.527	103.000
2020/2021	19.717	107.000

Fonte: (Conab 2020).

Segundo Fancelli & Tsumanuma (2007), o potássio (K) exportado nos grãos corresponde a apenas 19% do total acumulado na parte aérea do milho, em contrapartida para o nitrogênio e fósforo essa proporção chega em 82% e 79%, respectivamente. O uso de fertilizantes solúveis de NPK é uma alternativa eficiente que possibilita o aumento expressivo da produtividade de milho.

No entanto, recentemente o uso de remineralizadores de solo ficou mais frequente no setor agropecuário, diversas pesquisas mostraram resultados positivos nessa nova alternativa de fertilizantes. Segundo Resende *et al.* (2006c) experiências com pó de biotita xisto, e principalmente com ultramáfica alcalina em cultura de milho apresentaram resultados preliminares promissórios envolvendo a quantidade de K nas partes aéreas.

7.3 MANDIOCA

A mandioca (*Manihot esculenta crantz*) é uma planta de grande consumo pelo Brasil e no mundo, é uma cultura de grande importância nos trópicos, por ser um alimento básico, sua facilidade de cultivo e capacidade de se transformar, podendo ser armazenado como alimento por diversos anos (Nassar *et al.* 2009).

Este plantio é cultivado em todo território brasileiro, demonstrando a sua grande capacitação em se adaptar as mais severas condições de solo, clima, pragas e doenças pelo país. Historicamente o cultivo deu-se em sua maioria por pequenos produtores, que tinham áreas marginalizadas por outras culturas mais rentáveis (Souza & Souza 2002).

A mandioca é uma planta com grande destaque por ser uma planta de múltiplos usos, onde o consumo está presente tanto na alimentação humana quanto animal, além do uso industrial da fécula, amido extraído da cultura, conhecido como polvilho doce, sendo um dos seus principais derivados (Rosa Neto & Marcolan 2010).

O plantio de mandioca nas regiões do Brasil ao longo dos anos apresenta um quadro bastante estabilizado, com exceção da região norte e nordeste, onde a primeira teve um crescimento de 20% da área plantada, e a segunda, um decréscimo de aproximadamente 20% (Tabela 4). A Região Norte lidera a produção de mandioca com 36,1% da safra nacional, seguida pela Região Nordeste com 25,1% e pela Região Sul, representando a terceira força produtora com 22,1% da produção nacional. As regiões Norte e Nordeste juntas apresentam cerca de 61,18% da produção nacional de mandioca (T) em 72% das áreas cultivadas (Ha), obtendo as maiores produções nacionais (Tabela 5) (Fernandes 2017).

Tabela 4 - Gráfico da área plantada de mandioca no Brasil por hectares

Regiões	1990	2017
Norte	17,1%	34,6%
Nordeste	57,3%	37,4%
Centro-oeste	3,6%	4,4%
Sudeste	7,3%	8,7%
Sul	14,8%	11,5%

Fonte: (Fernandes 2017).

Tabela 5 - Percentual da produção de mandioca (t/ha) no território nacional

Regiões	Produção de mandioca (t)	Distribuição percentual
Demais estados do Brasil	7.999.100	38,82%
Demais estados da região norte	3.200.184	15,53%
Região Nordeste	5.172.156	25,10%
Estado do Pará	4.234.597	20,55%

Fonte: (Fernandes 2017).

Apesar da sua importância alimentícia e econômica, a mandioca tem sido pouco estudada, logo se faz necessário, o incentivo a novas pesquisas, a fim de avançar na compreensão das alterações fisiológicas, bioquímicas e produtivas ao longo do crescimento e desenvolvimento desta cultura (Albuquerque *et al.* 2012). As características vegetativas e reprodutivas da mandioca podem ser influenciadas por fatores nutricionais, assim, o potássio (K) é um dos nutrientes mais importantes para o crescimento, além do teor de carboidratos,

proteínas da planta e outros fatores que ajudam consideravelmente a cultura (Gierth & Maser 2007 *apud* Silva *et al.* 2017).

A mandioca extraí com grande facilidade o potássio (K) que em geral apresenta baixa disponibilidade no solo e acaba afetando as plantas, conseqüentemente a cultura e a qualidade das ramas utilizadas no plantio. Este nutriente promove também a assimilação de CO₂, a síntese de amido e a translocação de carboidratos das folhas para os tubérculos e raízes tuberosas de culturas, aumentando a produtividade e a melhoria da qualidade de tubérculos (Otsubo *et al.* 2007, Mehdi *et al.* 2007 *apud* Silva *et al.* 2017).

Estudos realizados por Vilela *et al.* (2002) e Curi *et al.* (2005) indicam que os solos do território brasileiro são pobres em minerais contendo potássio (K) e apresentam baixa capacidade de retenção de cátions, proporcionando as perdas por lixiviação dos fertilizantes de alta solubilidade.

Segundo Silva *et al.* (2017), em volume o K é o segundo elemento mineral mais utilizado no Brasil, correspondendo a cerca de 30% do mercado de adubos. Oliveira (2008) afirma que cerca de 90% do potássio utilizado na agricultura é importado, em 2007 gerou um déficit de US\$ 1,5 bilhão na balança comercial.

Assim, torna-se relevante para determinadas regiões do país a busca por fontes alternativas de potássio (K), principalmente no cultivo da mandioca, e nesta perspectiva diversa pesquisa tem sido desenvolvidas com foco em rochagem (Martins *et al.* 2010). Rochas silicáticas, como micaxisto finamente moídos e com teores expressivos de potássio (K), podem representar uma alternativa para a produção de mandioca, por serem fontes de nutrientes e condicionadoras de solo, beneficiando as características físico-químicas dos mesmos.

8 RESULTADOS

As amostras coletadas correspondem ao litotipo da Formação Xambioá classificado como micaxisto e estão em contato concordante (Figura 6) com mármores desta mesma formação. Estas rochas afloram de forma expressiva em toda área de prospecção da Minerax. O mármore é a rocha utilizada pela empresa como um remineralizador de solo no setor agrícola, sendo aplicado principalmente como calagem de solos ácidos, o micaxisto, por sua vez, não é usado pela empresa como produto de exploração, sendo classificado como resíduo da mineração.



Figura 7 - Visão geral de um dos afloramentos da Formação Xambioá na área de exploração da Minerax, destacando (em amarelo) o contato concordante entre xisto e mármore, bem como a intercalação de camadas entre os dois conjuntos litológicos.



Figura 8 - Detalhe do contato entre micaxisto e do mármore da Formação Xambioá, dentro da área de exploração da empresa Minerax.

8.1 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA

O estudo petrográfico foi realizado em 3 amostras de micaxisto, possibilitando a análise petrográfica em lâmina delgada para determinar a associação mineral, análise modal dos minerais, bem como a identificação das feições texturais/microtexturais e dos argilominerais.

8.1.1 Análise petrográfica em micaxisto

O micaxisto descrito no presente trabalho apresenta cor cinza com tonalidades esverdeadas, xistosidade marcante definida essencialmente por micas (biotita e muscovita) e por cristais de quartzo. De modo geral é uma rocha mesocrática com textura fanerítica, com

granulação fina a média, composta basicamente por minerais micáceos, quartzo, feldspatos potássicos, plagioclásio e outros minerais como acessório (zircão e anfibólio).

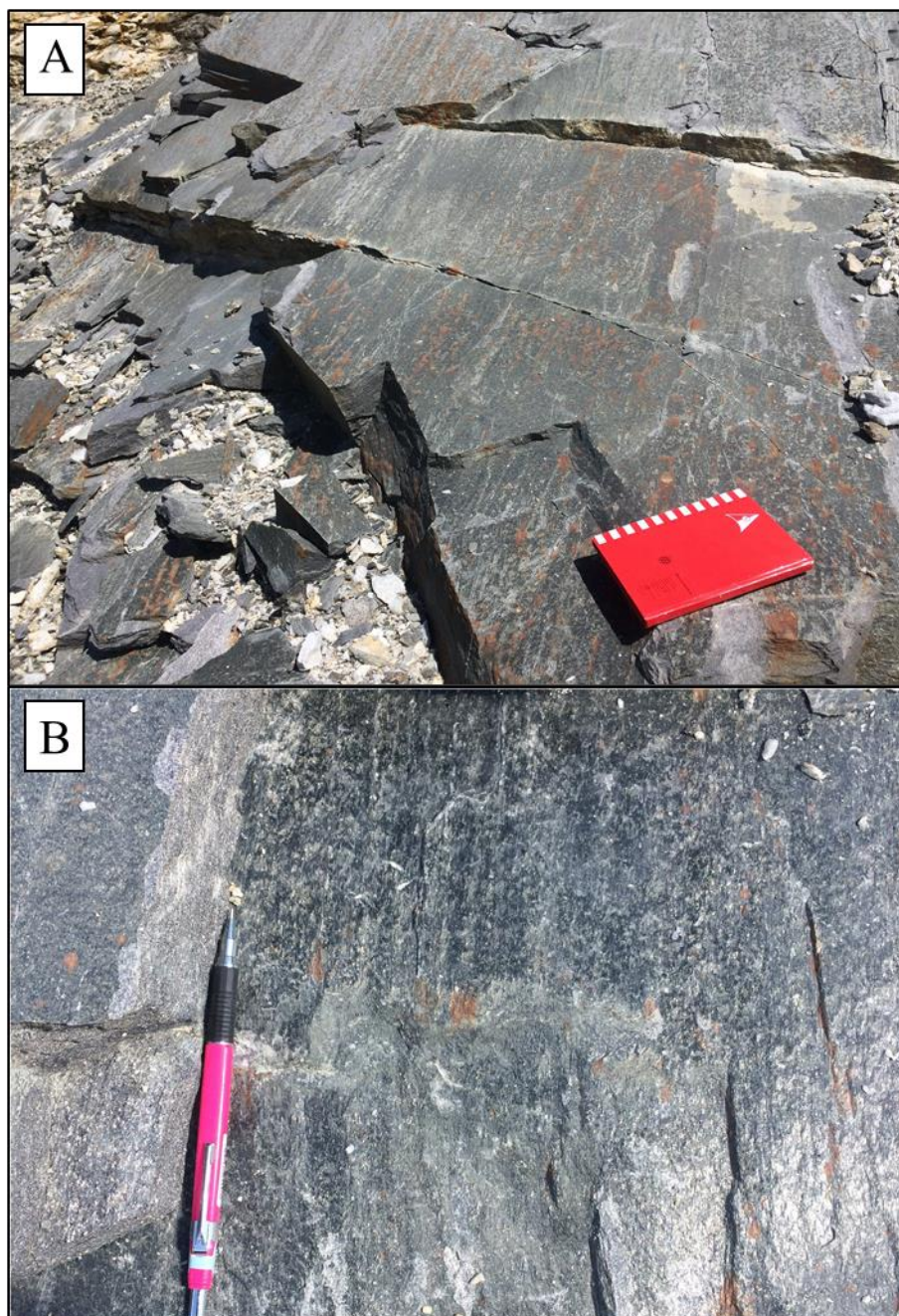


Figura 9 - Detalhe do micaxisto da Formação Xambioá em afloramento. A) Vista em planta do afloramento de micaxisto destacando a foliação bem definida, além de porções fraturadas e intemperizadas. B) Detalhe do plano da foliação em micaxisto destacando a lineação mineral do quartzo.



Figura 10 - Exemplos de micaxisto da Formação Xambioá. A) Amostra de rocha com dobras pegmatíticas formando ângulo agudo com a xistosidade, indicando diferentes pulsos de deformação. B) Detalhe da granulação gradacional da rocha com cristais de diferentes tamanhos (variando de fino a médio).

As rochas descritas em lâminas delgadas (MX-00, MX-01 e MX02) neste trabalho, apresentam textura geral lepidoblástica, localmente nematoblástica, granulação fina a média, com foliação e lineação mineral definidas por cristais de micas e quartzo. A análise modal mostrou a presença dominante na amostra MX-00 de quartzo (35%), flogopita (32%), plagioclásio (18%), feldspato alcalino (8%) e calcita (7%) (Figura 11). As lâminas MX-01 e 02 (figuras 12 e 13, respectivamente) apresentam essencialmente os minerais biotita (34-36%), muscovita (15-18%), quartzo (28-44%) e opacos (4-10%).

Na lâmina MX-00 o quartzo (Qtz) é o mineral em maior quantidade, apresenta hábito granular e frequentemente estirado, orientado paralelamente aos filossilicatos. Os cristais de Qtz são anédricos, com dimensões que variam de 0,1mm a até 1,2mm e exibem extinção ondulante moderada. A flogopita (Phl), componente principal entre os minerais máficos, se apresenta na forma de cristais subédricos a anédricos, de cor amarelo/marrom pálido a quase incolor e com hábito lamelar orientado, algumas vezes com processo de cloritização.

Os plagioclásios apresentam maclas do tipo albita (Ab), os cristais são anédricos e raramente subédricos, com dimensões que variam de 0,1mm a 0,5mm. Há a presença de feldspato alcalino de forma pontual na rocha, fazendo contato irregular com cristais de flogopita. Ambos os minerais são encontrados em processo de caulinição.

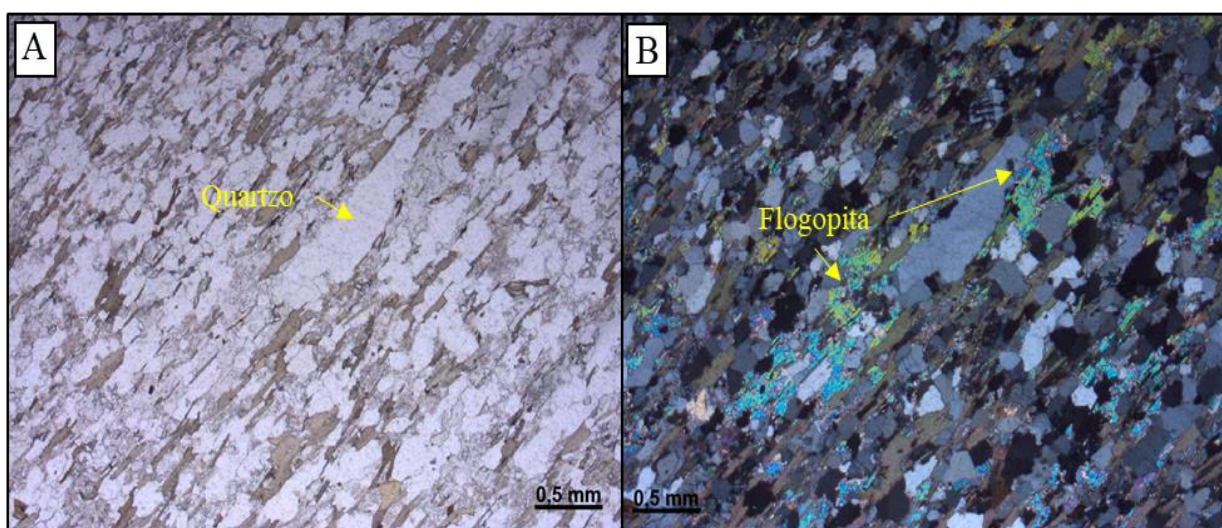


Figura 11 – Aspecto geral da textural lepidoblástica da lâmina MX-00, os cristais de quartzos (Qtz) ocorrem em maior proporção na lâmina. A flogopita (Phl) também é um mineral abundante na rocha com maior facilidade de intemperismo. É possível observar que alguns cristais de feldspatos estão em processo de alteração (caulinização). A) luz natural; B) nicóis cruzados.

Nas lâminas MX-01 e 02, os cristais de quartzo apresentam hábito granular e, por vezes, estão alongados em uma direção preferencial paralelo a orientação dos filossilicatos, são cristais anédricos, com dimensões que variam de 0,1 mm a até 0,8mm e com extinção ondulante moderada. A biotita (Bt) é o mineral que ocorre em maior proporção dos máfico nas rochas, são cristais subédricos a anédricos que variam de 0,2mm a 1mm, apresentam pleocroísmo que vai de um amarelo pálido a marrom, com hábito lamelar definindo a xistosidade da rocha.

A muscovita (Ms) está presente como cristais delgados e também orientados segundo uma direção principal, são cristais incolor, subédricos a anédricos e com hábito lamelar, e

dimensões de até 1,5mm. O álcali-feldspato está presente na lâmina MX-01 como cristais anédricos e com hábito granular com dimensão de até 0,2mm. Em geral está alterado para argilominerais, o que muitas vezes dificulta sua caracterização ótica.

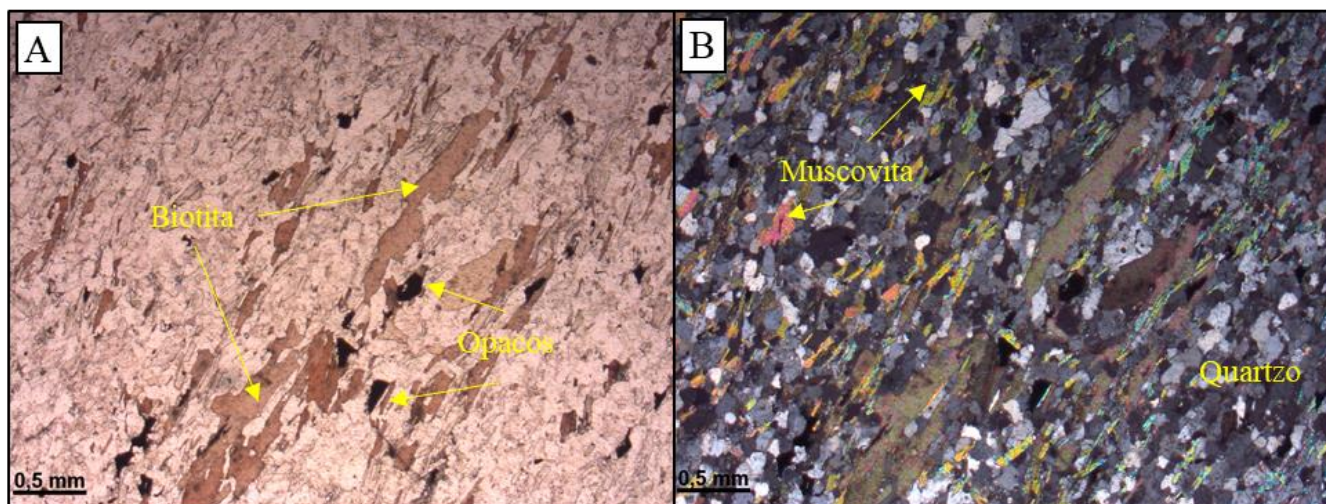


Figura 12 – Aspecto textural geral da lâmina MX-01 com o domínio de quartzo (Qtz) e biotita (Bt) definindo a xistosidade da rocha. É possível observar também cristais de muscovita (Ms) e minerais opacos, possivelmente óxidos de ferro. A) luz natural; B) nicóis cruzados.

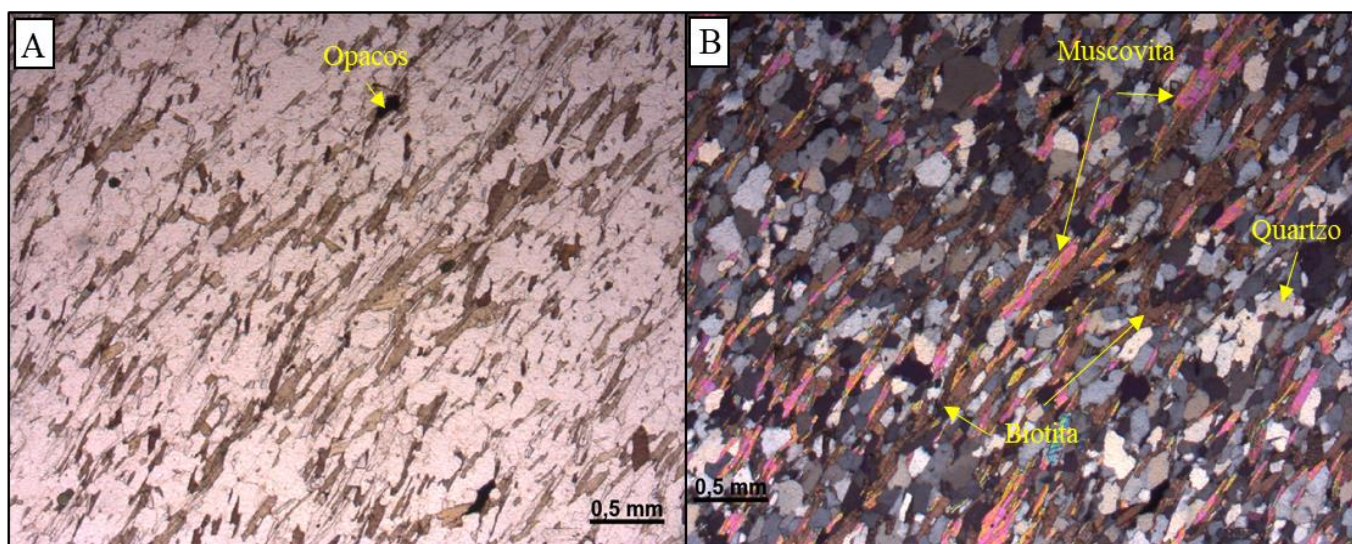


Figura 13 - Aspectos texturais e mineralógico da lâmina da amostra de micaxisto MX-02. A rocha apresenta textura lepidoblástica definida pela orientação dos cristais de biotita (Bt), muscovita (Ms) e quartzo (Qtz). Os cristais de Bt e Ms apresentam granulação fina e por vezes média, sendo uma das características físicas que interferem diretamente na moagem da rocha, principalmente no manejo das culturas de longo e curto prazo. A) luz natural. B) nicóis cruzados.

8.2 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A difração de raios-X (DRX) consiste em uma técnica analítica de fase de minerais que neste trabalho foi utilizada com o objetivo de complementar a identificação mineralógica a partir da análise petrográfica, considerando que as amostras de rocha estudadas apresentam minerais alterados de difícil identificação.

As análises de DRX identificam a mineralogia utilizando feixes de raios-X que incidem sobre a amostra e determinam a estrutura cristalina dos minerais. O resultado é apresentado em forma de difratograma que indicam a estrutura cristalina das fases minerais analisadas.

8.2.1 Análise por DRX no micaxisto

A análise foi realizada na amostra MX-00 e o resultado obtido identificou a mineralogia e o argilomineral presente em rocha total (RT). O difratograma de raios-X indica a presença de flogopita, quartzo, plagiocásio (tipo albita), feldspato potássico (tipo anortoclásio), calcita e caulinita (argilomineral) (Figura 14). A DRX apresenta resultados qualitativos dos minerais predominantes na amostra de micaxisto e as composições químicas apresentadas são aquelas utilizadas com base em padrões internacionais descritos do manual de ciência dos minerais (Klein & Dutrow 2012).

No difratograma (Figura 14) é possível observar que os picos de maior intensidade estão associados a flogopita ($\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$), mica rica em potássio e magnésio, ao quartzo (SiO_2) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Os picos de intensidades inferiores sugerem como o anortoclásio ($\text{NaKAlSi}_3\text{O}_8$), a calcita (CaCO_3), e a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) como argilomineral de alumínio hidratado, produto de alteração do feldspato. A tabela 6 apresenta a mineralogia dominante da rocha, mostrando sua composição química, classe de cada mineral e sua predominância na rocha.

Tabela 6 - Mineralogia qualitativa do micaxisto por análise de espectro de DRX.

Mineral	Composição Padrão	Classe mineral	Predominância
Flogopita	$\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	Mica	Alta
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Feldspato sódico	Alta
Quartzo	SiO_2	Sílica	Alta
Anortoclásio	$(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Feldspato alcalino	Baixa
Calcita	CaCO_3	Carbonato	Baixa
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Argilomineral	Baixa

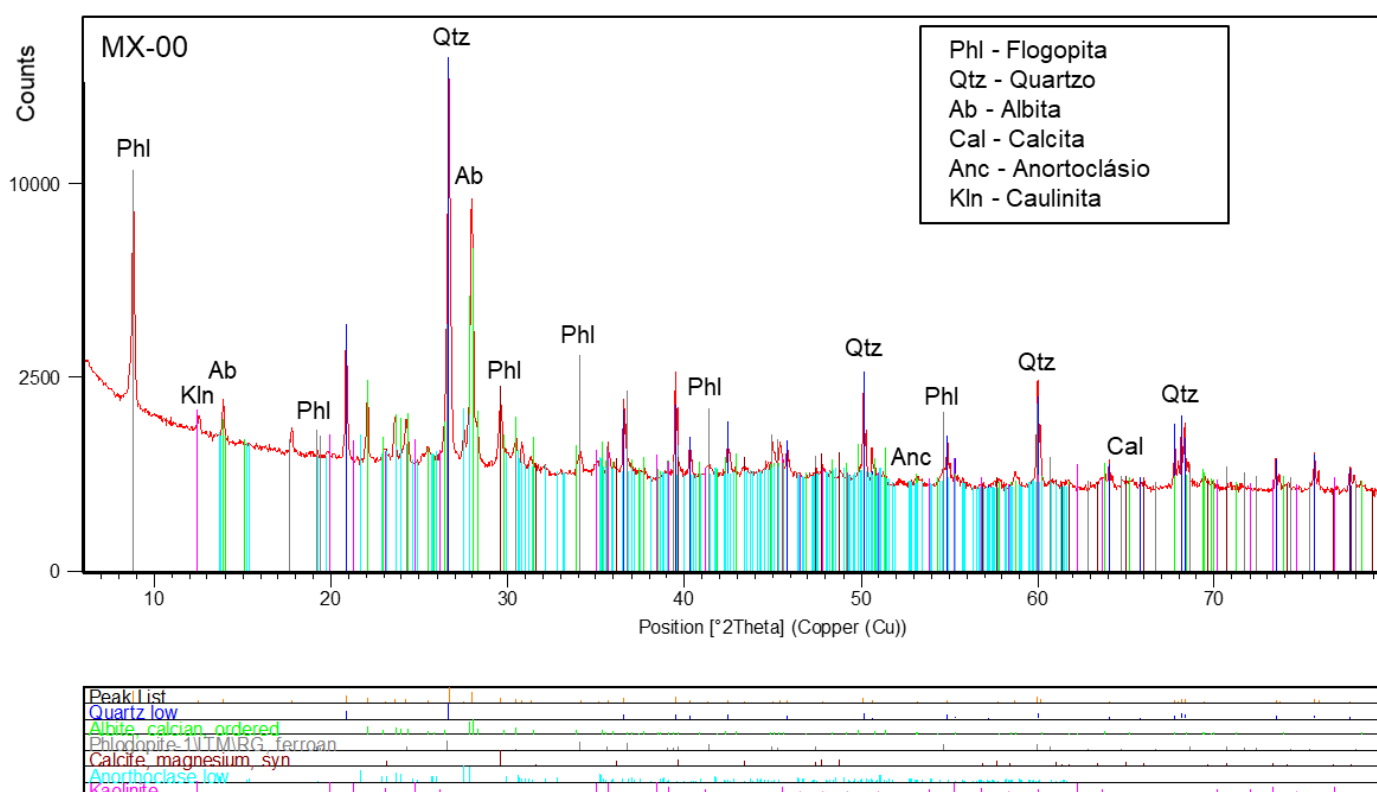


Figura 14 - Difratograma de difração de raios-X do pó do micaxisto da Pedreira da Empresa Minerax. O eixo x representa 2θ (Cu) e o y representa a intensidade dos reflexos.

A análise de DRX é uma ferramenta analítica importante na identificação das fases minerais que contenham em sua estrutura a presença de alguns dos macronutrientes, como K, Mg e Ca, elementos de importância para o metabolismo e desenvolvimento das plantas. Neste caso, vale ressaltar, que o Fe é o único micronutriente identificado na rocha analisada, embora necessário para a planta, não precisa de volumes elevados, pois a absorção é relativamente baixa. Outros nutrientes foram identificados como sílica, sódio e alumínio, não se encaixando nos parâmetros de macro e micronutrientes.

9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho revelaram o potencial dos micaxistos da Formação Xambioá como remineralizador de solo. As análises petrográficas mostraram que a composição mineralógica geral das lâminas MX-00, 01 e 02 são predominantemente flogopita, biotita, muscovita, quartzo, feldspato e albita, e o resultado de DRX (lâmina MX-00) revelou a presença de calcita e caulinita na amostra.

A análise modal da lâmina MX-00 mostrou uma quantidade considerável de flogopita, este mineral é uma importante fonte de K na rocha. Segundo Deer, Howie e Zussman (2008), minerais como a flogopita pode portar 11,30 % de K₂O e quantidades de MgO superiores a 20% em sua estrutura cristalina. Este mineral é capaz de disponibilizar o íon potássico no solo com maior facilidade do que minerais como os feldspatos potássios, pois suas ligações químicas são de caráter mais fraco (Bergmann 2017).

A biotita e a muscovita estão em grande volume nas lâminas (MX-01 e 02) e segundo dados apresentados por Manning (Tabela 7) (2009), a biotita apresenta percentuais de 7,62 % de K e 9,18 % de K₂O em sua estrutura, é um mineral com grande suscetibilidade à alteração, disponibilizando com facilidade o K para as plantas. Além disso, os minerais citados anteriormente (flogopita e biotita) têm apresentado potencial promissor para uso como fontes de K proveniente de rochas moídas e utilizadas na remineralização de solos (Castro *et al.* 2005; Resende *et al.* 2005). A muscovita embora apresente cerca de 9% de K₂O e presença de outros multielementos como fornecedores de nutrientes, este mineral não é solúvel em água e suas estruturas são rompidas com grande dificuldade, por meios artificiais ou durante um longo período de intemperismo (Martins *et al.* 2008).

Tabela 7 – Fórmula química e conteúdo de potássio (expresso como elemento e óxidos) em minerais formadores de rochas silicáticas.

Mineral	Composição Padrão	%K	%K ₂ O
Flogopita	KMg ₃ Si ₃ AlO ₁₀ (OH, F) ₂	9,38	11,30
Biotita	K ₂ Fe ₆ Si ₆ Al ₂ O ₂₀ (OH) ₄	7,62	9,18
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	9,03	10,88
K-Feldspato	KAlSi ₃ O ₈	14,03	16,91

Com a análise petrográfica também foi possível identificar o quartzo (SiO_2) como mineral de conteúdo expressivo nas amostras de micaxistos estudadas. O quartzo é considerado um mineral inerte para o solo e levando em consideração os critérios propostos pela norma de remineralizadores de solos – MAPA IN 05/2016 (Brasil 2016), que atualmente estabelece um limite máximo de 25% de SiO_2 livre (quartzo) no produto comercializado. É possível que os teores de SiO_2 livre presente nos micaxistos estejam acima dos limites propostos pela norma. Além disso, considerando que o quartzo em excesso no solo pode atingir volumes indesejados ao longo do tempo, ocupando espaço de minerais úteis para o solo-planta (Blaskowski *et al.* 2016).

O plagioclásio (tipo albita) é também um mineral abundante (amostra MX-00), como remineralizador ele tem elevada facilidade de ser dissolvido, tende a desagregar-se logo nos primeiros estágios de alteração. Estas modificações físicas estão intimamente relacionadas com as transformações químicas que resultam em argilominerais (1:1) como produto de alteração. A caulinita é o mineral de argila mais comum resultante destas alterações e propicia a liberação de alguns nutrientes como o silício (Si) e sódio (Na) no solo (Truffi & Clemente 2002).

As amostras estudadas de micaxisto da Formação Xambioá apresentam baixa quantidade modal de feldspato potássio (anortoclásio). Em geral, feldspatos potássicos apresentam teores elevados de K, são resistentes ao intemperismo e de difícil abertura para a liberação de K no ciclo adequado à escala agrônômica (Blaskowski *et al.* 2016). No entanto, minerais do tipo anortoclásio quando alterados geram argilominerais que podem liberar mais facilmente K para o solo.

Por fim, o carbonado do tipo calcita, apesar de apresentar baixos teores nas amostras de rochas estudadas, podem atuar como fonte de Ca, promover um caráter mais alcalino de remineralizador e funcionar como neutralizador de pH.

10 CONCLUSÕES

O Brasil apresenta uma grande geodiversidade em termos de rochas por todo seu território nacional, sendo um grande produtor de recursos minerais, muitos deles sendo empregados no setor agrícola como insumos, ajudando na remineralização do solo e aumentando o desenvolvimento do plantio. Neste sentido, a procura por rochas adequadas para ser usadas como remineralizadores tornou-se uma alternativa viável para esse mercado promissor.

Nos últimos anos, a rochagem ou remineralização dos solos vem tomando espaço e se consolidando como uma tecnologia alternativa ou de suporte na agricultura, em especial na de pequena escala ou familiar. Porém esta técnica necessita a princípio do entendimento da mineralogia da rocha utilizada, ou seja, do conhecimento da associação mineral, composição química, aspectos texturais, granulação/granulometria e a da morfologia dos cristais que compõem a rocha. A técnica atua de forma direta nos solos agrícolas, onde o pó da rocha é aplicado como fertilizantes de liberação rápida ou lenta de nutrientes para o solo e plantas. Este processo pode ser acelerado por meio de alterações físicas e químicas que ocorre durante o intemperismo nas rochas ou por técnicas de diluição realizadas em laboratórios.

A composição mineralógica do micaxisto da Formação Xambioá (TO) apresenta potencial para ser usado como agromineral, já que esta rocha é formada por minerais que possuem composição química favoráveis para serem fontes de nutrientes. É importante destacar que este potencial está relacionado com os processos intempéricos e de moagem (granulometria) a que estas rochas são submetidas. Segundo Theodoro & Leonardos (2006b), o tamanho dos grãos é um fator importante na disponibilidade de nutrientes. A granulometria tamanho argila (menor que 0,002m) e silte (0,05 a 0,002m) são mais propícias a liberação de nutrientes ao solo em função do intemperismo, enquanto que a granulometria mais grossa fornecem de forma mais lenta e prolongada a oferta de macro e micronutrientes. De modo geral, as amostras de micaxistos estudadas já apresentam uma granulação fina e rara as vezes média, sendo favoráveis para moer na granulação tamanho silte, argila, ou até mesmo um mix de ambos, com a finalidade de aplicar em culturas de curto prazo.

Os resultados obtidos a partir das análises petrográficas, difração de raios-X, bem como o levantamento bibliográfico da geologia dos micaxistos da Formação Xambioá e a da técnica de rochagem/remineralização do solo, permitiram interpretar os resultados de forma positiva em relação ao conteúdo mineralógico da rocha. As amostras de micaxistos estudadas revelaram ser uma possível fonte de macro e micronutrientes (K, Mg, Ca e Fe) para o solo,

considerando a presença de minerais como flogopita, biotita e até mesmo muscovita e k-feldspato. No entanto, devido a elevada quantidade de quartzo na rocha, o micaxisto não se encaixa perfeitamente nos critérios proposto pela norma dos remineralizadores. Neste caso, recomenda-se análises mineralógicas em rocha total de maior precisão, a fim de refinar os resultados obtidos pelas análises petrográficas e de DRX, e também propor um *blend* (mistura) com rochas que estejam adequadas as normas, fazendo com que o volume de quartzo do micaxisto venha a diminuir de forma a se encaixar na legislação vigente.

A recomendação do presente trabalho é que seja realizados análise litoquímica na rocha, para saber primeiramente se a soma de bases ($K_2O + MgO + CaO$) é superior ou igual a 9%, se enquadrando dentro do critério proposto para os remineralizadores de solo (IN MAPA 05 e 06/2016), e também para detectar a presença de elementos tóxicos ou potencialmente tóxicos (EPT) para as plantas ou inapropriadas para o consumo. É de fundamental importância fazer ensaios agronômicos com o pó do micaxisto para avaliar o seu desenvolvimento como remineralizador em diferentes culturas/plantios ou utilizar as que foram sugeridas deste trabalho.

Nos últimos anos a rochagem tem demonstrado ser relevante para o desenvolvimento da agricultura, principalmente na substituição ou redução dos fertilizantes convencionais, proporcionando na prática os benefícios nutricionais que o pó de rocha pode fornecer para o solo e conseqüentemente para as plantas, disponibilizando nutrientes de forma continua e gradativa, além de ser uma técnica de caráter mais sustentável e de baixo custo financeiro para o setor agrícola.

REFERÊNCIAS

- Abreu F.A.M. 1978. O Supergrupo Baixo Araguaia. *In: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais[...]*, Recife, v. 2, p.539-545.
- Albuquerque J.A.A., Sedyama T., Silva A.A., Alves J.M.A., Finoto E.L., Alcântara Neto F. 2012. Desenvolvimento da cultura de mandioca sob interferência de plantas daninhas. *Planta Daninha*, **30**(1):37-45.
- Alvarenga C.J.S., Moura C.A.V., Gorayeb P.S.S., Abreu F.A.M. 2000. Paraguay and Araguaia belts. *In: Cordani U. G., Milani E. J., Thomaz Filho A., Campos D. A. Tectonic evolution of South America*, p.183-193.
- Alves C.L.A. 2006. Petrografia, geoquímica e geocronologia do Granito Ramal do Lontra e sua relação com a tectônica e metamorfismo do Cinturão Araguaia, Xambioá-TO. *Dissertation, Mestrado em Geoquímica e Petrologia, CPGG/UFPA*, 131p.
- Arcanjo S.H.S & Moura C.A.V. 2000. Geocronologia das rochas do embasamento do setor meridional do Cinturão Araguaia na região de Paraíso do Tocantins (TO). *Revista Brasileira de Geociências*, **30**:665-670.
- Arcanjo S.H.S., Abreu F.A.M., Moura C.A.V. 2013. Evolução geológica das sequências do embasamento do Cinturão Araguaia na região de Paraíso do Tocantins (TO), Brasi. *Brazilian Journal of Geology*, **43**: 501-514.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. 2020. *Indicadores do mercado de fertilizantes*. Acessado dia 24 de abril de 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/indicadores-da-agropecuaria/item/download/31690_3df5cc44878772e6c4d5581d42a67fd6.
- Andrade F.N., Rocha M.M., Gomes R.L.F., Freire Filho F.R., Ramos S.R.R. 2010. Estimativas de parâmetros genéticos em genótipos de feijão-caupi avaliados para feijão fresco. *Revista Ciência Agronômica*, **41**(2): 253-255.
- Batista N.T.F., Ragagnin V. A., Gorgen C. A., Martins E.S., Bizão A.A., Moraes L.F., Hack E., Marques A.L.G., Carvalho R.S., Assis L.B., Arruda E.C. 2013. Uso de pó de rocha como condicionador de solos e fertilizante em cultura de cana-de-açúcar. *In: 2º Congresso Brasileiro de Rochagem, Resumos[...]* Poços de Caldas.
- Barros J. F. C & Calado J. G. 2014. Cultura do milho. *Caderno Didático*, Universidade de Évora, 52p.
- Bergman M., Blaskowski A. E., Silveira C. A. P., Simas M. W., Camargo M. A., Cavalcante O. A. 2017. Caracterização de flogopititos e outras rochas encaixantes das mineralizações de esmeralda de Campo Formoso e Pindobaçu (BA) como fontes de potássio e multinutrientes para remineralização de solos. *In: 3º Congresso Brasileiro de Rochagem, Anais[...]*, Pelotas.
- Bezerra Neto E., Barreto L.P., Coelho J.B.M. 2015. Considerações sobre nutrição mineral e o caso do feijão vigna. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, **11/12**: 85-120.

Bitocchi E., Rau D., Bellucci E., Rodriguez M., Murgia Maria L., Gioia T., Santo D., Nanni L., Attene G., Papa R. 2017. Beans (*Phaseolus* spp.) as a model for understanding crop evolution. *Frontiers in Plant Science*, **8**:722.

Blaskowski A.E., Bergmann M., Cavalcante O.A. 2016. *Agrominerais da região Irecê-Jaquari. Informe de recursos minerais*. Série Insumos Minerais para a Agricultura. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. SUREG Salvador, 105p.

Brasil. 2013. *Lei n. 12.890*, de 10 de dezembro de 2013. Inclui os remineralizadores como uma categoria de insumos destinados a agricultura, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Seção 1, 11/12/2013.

Brasil. 2016. Mapa in 05/2016. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. *Instrução Normativa DAS N.º 05* de março de 2016. Dispõe sobre os critérios e protocolos em remineralizadores e substratos para as plantas, destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 de março de 2016. Seção 1: 10-11.

Caldarelli C.E & Bacchi M.R.P. 2012. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. *Nova Economia*, UFMG. Impresso, **22**: 141-164.

Campos M. C. C., Ribeiro M. R., Souza Júnior V. S., Ribeiro Filho M. R., Souza R. V. C. C., Almeida M. C. 2011. Características mineralógicas de latossolos e argissolos na região sul do Amazonas. *Revista Acadêmica: Ciência Animal*, **9**: 11-18.

Castro C., Oliveira F.A., Salinet L.H. 2005. Rochas Brasileiras como fontes alternativas de potássio para uso em sistemas agropecuários – efeito residual. In: 16º Reunião Nacional de Pesquisa em Girassol, *Anais[...]*. Londrina, Embrapa Soja.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. *Central de Informações Agropecuárias*. Acesso em: 13 Abril de 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=131>.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. *Central de Informações Agropecuárias (Milho)*. Acesso em: 13 abril de 2021. Disponível em: <http://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. *Central de Informações Agropecuárias (Feijão)*. Acesso em: 14 abril de 2021. Disponível em: <http://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html>.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. 2020. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos*, v.8 – safra 2020/2021, n.3 – Terceiro levantamento, Brasília,DF, p. 40-41.

Costa M.R.T., Homma A.K.O., Rebello F.K., Souza Filho A.P.S., Costa W.B., Fernandes G.L.C. 2017. *Atividade agropecuária no Estado do Pará*. Belém-PA, Embrapa Amazônia Oriental. 75p.

Costa J.B.S. 1980. Estratigrafia da Região de Colméia-GO. In: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia, *Anais[...]* Camboriú, p.720-728.

Costa J.B.S., Gorayeb P.S.S., Bermeguy R.L., Gama Jr. T., Kotschoubey B., Lemos R.L. 1983. *Projeto Paraíso do Norte*. Belém, UFPA, 125p.

Curi N., Kampf N., Marques J.J. 2005. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. *In: Yamada T. & Roberts T.L. (ed.). Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, p. 91- 122.

Doumer M.E., Abate G., Messerschmidt I., Assis L.M., Martinazzo R., Silveira C.A.P. 2016. Efeito da ativação química nas propriedades de superfície de xisto retornado. *Quím. Nova*, São Paulo, **39**(4):431-436.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, 306p.

Fancelli A.L & Tsumanuma G.M. 2007. Nitrogênio e enxofre nas culturas de milho e feijão. *In: Yamada T., Abdalla S.R.S., Vitti G.C. (ed.). Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira*. Piracicaba: IPNI Brasil. p.445- 486.

Fernandes G.L. 2017. *Análises gráficas dos principais produtos agropecuários do Estado do Pará. Cultura de Mandioca*. Belém-PA, Embrapa Amazonia Central.

Gorayeb P.S.S. 1981. *Evolução geológica da região de Araguacema- Pequiizeiro (GO)*. Dissertation, Universidade Federal do Pará, 99p.

Gorayeb P.S.S. 1996. *Petrologia e evolução estrutural das rochas de alto grau de Porto Nacional – TO*. PhD Theses, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 258p.

Gorayeb P.S.S., Moura C.A.V., Abreu F.A.M. 2008. Geologia do parque Andorinhas e região adjacente. *In: Gorayeb P.S.S. (org) Parque Martírios-Andorinhas: conhecimento, história e preservação*. Belém, EDUFPA, p.57-80.

Gorayeb P.S.S., Moura C.A.V., Chaves C.L., Lobo L.R.S. 2013. Neoproterozoic granites of the Lajeado intrusive suite, north-center Brazil: A late Ediacaran remelting of a Paleoproterozoic crust. *Journal of South American Earth Sciences*, **45**: 281-282.

Gorayeb P.S.S., Santos W.P., Moura C.A.V., Sousa L.H. 2019. Petrologia, geoquímica e geocronologia do Granodiorito Presidente Kennedy: contextualização na evolução do Cinturão Araguaia. *Geologia USP. Série Científica*, **19**: 100-101.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2019. *Pedologia do Brasil*. (Escala 1:250.000). Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/versao_2019/.

Klein C & Dutrow B. 2012. *Manual de ciências dos minerais*. Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. 23. ed. Porto Alegre, Bookman.

Lei de remineralizadores de solo, n° 12.890 de 10 de dezembro de 2013. Acessado dia 20 de abril de 2021. Disponível em <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2013/lei-12890-10-dezembro-2013-777603-norma-pl.html>.

Lapido-Loureiro F.E.V. & Nascimento M. 2009. *Importância e função dos fertilizantes numa agricultura sustentável e competitiva. Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro, CETEM/Petrobrás, p.81-132.

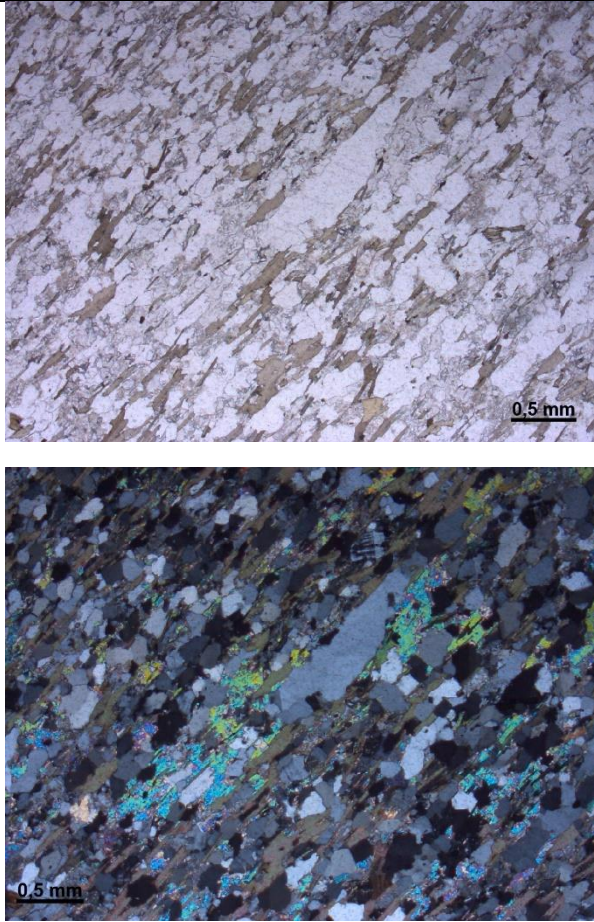
- Lapido-Loureiro F.E.V. & Ribeiro R.C.C. 2009. *Fertilização natural: rochagem, agricultura orgânica e plantio direto: breve síntese conceitual*. Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade. Rio de Janeiro, CETEM/Petrobrás, p.149-172.
- Lamarão C.N & Kotschoubey B. 1996. Granitóides Santa Luzia: registro do magmatismo granítico brasileiro do cinturão araguaia na região de Paraíso do Tocantins (To). *Revista Brasileira de Geociências*, **26**(4):277-288.
- Leonardos O.H., Fyfe W.S., Kronberg B.I. 1976. Rochagem: o método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. *In: 29º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais[...]*, Belo Horizonte, p.137-145.
- Lepsch I. F. 2011. *19 lições de pedologia*. São Paulo, Oficina de Textos, 456p.
- Lima A.A.C., Oliveira F.N.S., Aquino A.R.L. 2000. *Aptidão agrícola dos solos do Estado do Tocantins*. [S.l.], Embrapa Agroindústria Tropical.
- Machado C.T.T., Resende A.V., Martins E.S., Sobrinho D.A.S., Nascimento M.T., Faleiro A.S.G., Linhares N.W., Souza A.L., Corazza E.J. 2005. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: II. Fertilidade do solo e suprimento de outros nutrientes. *In: UFRPE/SBCS, 30º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Recife, Anais[...]*. Recife.
- Macambira J.B. 1983. *Geologia e ocorrência minerais do Braquianticlinal do Lontra (GO)*. Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém – PA, 108p.
- Martins E.S., Oliveira C.G., Resende A.V., Matos M.S.F. 2008. *Agrominerais: rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. rochas & minerais industriais: usos e especificações*. 2ed. Rio de Janeiro, CETEM, v. 1, p.205-223.
- Manning D.A.C. 2009. *Mineral sources of potassium for plant nutrition*. A review. Institute for research on environment and sustainability, Newcastle University. INRA, EDP Sciences.
- Martins E.S & Theodoro S.H.C. (ed.). 2010. 1º Congresso Brasileiro de Rochagem: 21 a 24 de Setembro de 2009. Brasília,DF, Embrapa, *Anais[...]* p.321.
- Martins E.S., Resende A.V., Oliveira C.G., Furtini Neto A.E. 2010. Materiais Silicáticos como Fontes Regionais de Nutrientes e Condicionadores de Solos. *In: Fernandes F. R. C., Luz A. B. da, Castilhos Z. C. (org.). Agrominerais para o Brasil*. 1ed. Rio de Janeiro, RJ, CETEM, v. 1, p. 89-104.
- Malavolta E. 2006. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 638p.
- Melamed R., Gaspar J.C., Miekeley N. 2009. Pó-de-Rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais. *In: Loureiro F. E. L., Melamed R. G., & Figueiredo Neto J. D. Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2009. p. 385-395. (Série Estudos e Documentos Sed, 72).
- Moura C.A.V & Souza S.H.P. 1996. Síntese dos dados geocronológicos das rochas do embasamento do Cinturão Araguaia e suas implicações estratigráficas. *In: SBG, 39º Congresso Brasileiro de Geologia, Actas[...]* Salvador, p.31-34.

- Moura C.A.V & Gaudetter H.E. 1993. Evidence of Brasiliano/Pan African deformation in the Araguaia belt: Implication for Gondwana evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, **23** (2): 117-123.
- Moura C.A.V., Macambira M. J. B., Armstrong R. 2008. U-Pb Shrimp zircon age of the Santa Luzia Granite: constraints on the age of metamorphism of the Araguaia belt, Brazil. *In: South American Symposium on Isotope Geology, San Carlos de Bariloche Book of Abstracts*. Buenos Aires, INGEIS. v. 6.
- Nascimento M. & Lápido-Loureiro F.E.V. 2004. *Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p.66. (Série Estudos e Documentos, 61).
- Nassar N.M.A., Pires Junior O., Sousa M.V., Ortiz R. 2009. Improving carotenoids and amino-acids in Cassava. Recent Patents on Food, *Nutrition & Agriculture*, **1** (1):32-38.
- Oliveira L.A.M. 2008 Potássio. *Sumário Mineral*, DNPM.
- Paixão M.A.P. 2009. *Complexo Ofiolítico Quatipuru, Pará, Brasil*. PhD Theses, Universidade de Brasília, Brasília,DF, 300p.
- Pereira J.L.A.R., Von Pinho R. G., Souza Filho A. X., Pereira M.N., Santos A.O., Borges I.D. 2012. Quantitative characterization of corn plant components according to planting time and grain maturity stage. *Revista Brasileira de Zootecnia*, **41**(5): 1110-1117.
- Pereira Filho I.A. 2002. *O cultivo do milho verde*. Circular Técnica. Embrapa Milho e Sorgo, p.14-15.
- Pinheiro B.L.S. 2016. *Petrologia e geotermobarometria das rochas metamórficas do Cinturão Araguaia — região de Xambioá e Araguanã (TO)*. PhD Theses, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 258p.
- Porphírio N. H., Barbosa M. I. M., Bertolino L. C. 2010. Caracterização mineralógica de minérios: Parte I. *In: Luz A. B. da, Sampaio J. A., França S. C. A. (org.). Tratamento de minérios*. 5ed. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p.55-84.
- Resende A.V., Machado C.T.T., Martins E.S., Nascimento M.T., Sobrinho D.A.S., Faleiro A.S.G., Linhares N.W., Souza A.L., Corazza E.J. 2005. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: I. Respostas da soja e do milho. *In: UFRPE/SBCS, 30º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Recife, Anais[...]*. Recife, p.206-217.
- Resende A.V., Machado C.T.T., Martins E.S., Nascimento M.T., Sena M.C., Silva L.C.R., Linhares N.W. 2006c. Rochas moídas como fontes de potássio para o milho em solo de Cerrado. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, Planaltina-DF, Embrapa Cerrados, (162): 1-20.
- Resende A.V., Machado C.T.T., Martins E.S., Sena M.C., Nascimento M.T., Silva L.C.R., Linhares N.W. 2006a. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. *Espaço & Geografia*, **9**:135-161.

- Rodrigues A.F.S. 2009. *Agronegócio e mineral negócio: relações de dependência e sustentabilidade*. Informe mineral: desenvolvimento e economia mineral. Brasília, DF, DNPM, p.28.
- Rosa Neto C & Marcolan A.L. 2010. Estudo exploratório acerca do comportamento de consumo de mandioca e derivados no Brasil, com ênfase na região norte. In: SOBER, 48º Congresso da Sociedade Brasileira Economia, Administração e Sociologia Rural - Tecnologia, Desenvolvimento e Integração Social - Sober, Campo Grande-MS. *Anais[...]* Brasília-DF, p.2-19.
- Silva D.C.O., Alves J.M.A., Uchôa S.C.P., Sousa A.A., Barreto., G.F., Silva C.N. 2017. Curvas de crescimento de plantas de mandioca submetidas a doses de potássio. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences - Revista de Ciências Agrárias*, **60**:158-165.
- Silva D.J., Faria C.M.B., Mendes A.M.S., Morais A.T. 2006. Potencial de rocha silicáticas potássicas no fornecimento de macronutrientes para soja. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 16., 2006, Aracaju. *Resumos e palestras[...]* Aracaju, SBCS; UFS, Embrapa Tabuleiros Costeiros, Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/157466/1/OPB933.pdf>.
- Silva O.F & Wander A.E. 2013. *Feijão-comum no Brasil: passado, presente e futuro* (Série Documentos da Embrapa, 287). Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão (Técnico-científico).
- Silveira R.T.G. 2016. *Uso de rochagem pela mistura de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizante natural de solos tropicais lixiviados*. Dissertation, Mestrado em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília,DF, viii, 98p.
- Souza J.O & Moreton L.C. 2001. *Xambioá – Folha SB.22-Z-B. Estados do Pará e Tocantins*. Escala 1:250.000/– Brasília,DF, CPRM/DIEDIG/DEPAT. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. – PLGB).
- Souza L.D & Souza, L.S. 2002. *Manejo do solo para mandioca*. Dourados, MS, Embrapa Agropecuária Oeste, v. único.
- Souza F.N.S., Alves J.M., Nascente L.M. Martins M. 2013. Viabilidade do uso de pó de rocha como fonte alternativa de nutrientes no estado do Tocantins. In: 2º Congresso Brasileiro de Rochagem, Poços de Caldas. *Resumos[...]*, p.181-189.
- Souza F.N.S., Santana A.P., Alves J.M., Silva M.H.M. 2016. Efeitos de um remineralizador de solos (biotita-xisto) na produção de duas variedades de mandioca. *Revista Raízes e Amidos Tropicais*, **12**: 45-59.
- Theodoro S.H.C. 2000. *A fertilização da terra pela terra: uma alternativa de sustentabilidade para o pequeno produtor rural*. Ph.D. Thesis, University of Brasilia, Brasília,DF, p.231.
- Theodoro S.H.C & Rocha E.L. 2005. Rochagem: equilíbrio do solo e vigor para as plantas. In: 3º Congresso Brasileiro de Agroecologia e 3º Seminário Estadual sobre Agroecologia de SC., *Anais[...]*, Florianópolis. 1 CD- ROM.

- Theodoro S.H.C & Leonardos O.H. 2006. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **4**: 721-730.
- Theodoro S.H.C., Duarte L.G., Vianna J. N. S. Rocha E.L. 2009. *Agroecologia: um novo caminho para a extensão rural sustentável*. 1. ed. Rio de Janeiro, Garamond, v. 1. p.236.
- Theodoro S.H.C., Leonardos O. H., Almeida E. 2010. Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos. *In: 1º Congresso Brasileiro de Rochagem, 2010, Brasília,DF., Embrapa, Anais[...]*, v. 1. p.173-181.
- Theodoro S.H.C., Leonardos O.H., Rego Kleysson G., Medeiros F.P., Talini N.L., Santos F., Oliveira M. N. 2013. Efeito do uso da técnica de rochagem associada à adubação orgânica em solos tropicais. *In: 2º Congresso Brasileiro de Rochagem, Anais[...]*, Poços de Caldas, MG, p. 32-42.
- Theodoro S.H.C. 2020. *Cartilha da rochagem*. 2a ed. revisada (online), p.14-19.
- Tratto agronegócio. Pó de micaxisto como remineralizador de solo, nutrientes para o Solo. Acessado dia 13 de abril de 2021, disponível em <https://trattofmx.com.br>
- Truffi S.A & Clemente C. A. 2002. Alteração de plagioclásios dos riodacitos da formação serra geral (JKsg) da região de Piraju - SP. *Sci. Agric. Piracicaba, Braz.*, **59** (2):383-388.
- Van Straanten P. 2007. *Agrogeology – the use of rocks for crops*. Cambridge, Canada, Enviroquest, p.440.
- Vale J.C., Bertini C., Borém A. 2017. *Feijão-caupi: do plantio à colheita*. Viçosa, Ed. UFRV. p.267.
- Vilela L., Sousa D.M.G., Silva J.E. 2002. Adubação potássica. *In: Sousa D. M. G. & Lobato E. (ed.). Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina, Embrapa Cerrados, p.169-183.
- Wietholter S. 2000. *Calagem no Brasil*. Passo Fundo, Embrapa Trigo. p.104. (Documento 22).
- Winge M. *et. al.* 2001 – 2021. *Glossário geológico ilustrado*. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acessado em: 07 de abril de 2021.
- Yardley B. W. 1994. *Introdução à petrologia metamórfica*. Brasília,DF, Ed. Universidade de Brasília.

APÊNDICE A – FICHAS PETROGRÁFICAS

FICHA PETROGRÁFICA		
Sigla da Amostra	MX-00	
Localização (toponímia)	Empresa Minerax, corpo rochoso aflorante na cava sul	
Coordenadas (Lat/Long)	787012	9293601
Descrição (Microscopia Ótica):	Fotomicrografia	
<p>A rocha é rica em filossilicatos e exhibe orientação mineral preferencial, ressaltada principalmente pelas micas. A mineralogia essencial é determinada pela presença de quartzo, flogopita, plagioclásio, k-feldspato e calcita. Os opacos são os únicos representantes da mineralogia acessória, enquanto que a mineralogia secundária é composta por argilominerais e clorita. O máfico dominante é a flogopita, compondo cerca de 31 % da rocha.</p> <p>O quartzo, mineral presente em maior quantidade, apresenta hábito granular e, de forma recorrente, está orientado paralelamente aos filossilicatos. Os cristais são anédricos, com dimensões que variam de 0,1mm a até 1,2mm e exibem extinção ondulante moderada.</p> <p>A flogopita, componente principal da mineralogia de máficos é uma mica composta por cristais subédricos a anédricos, de cor amarelo/marrom pálido a incolor e com hábito lamelar orientado. O pleocroísmo é moderado e o mineral pode alcançar exemplares com até 0,8mm. Algumas vezes é encontrado em processo de cloritização.</p> <p>Os plagioclásios apresentam maclas do tipo albita. Os cristais estão recorrentemente alterados para argilominerais. Os cristais são anédricos e raramente subédricos, com dimensões que variam de 0,1mm a 0,5mm. Há a presença de feldspato alcalino de forma pontual na rocha, fazendo contato irregular com cristais de flogopita, e algumas vezes em processo de alteração para caulinição.</p> <p>A calcita está presente de forma pontual, com hábito granular e aspecto intergranular. Os cristais desse mineral exibem seu maior eixo paralelo a orientação dos filossilicatos. O mineral apresenta cristais anédricos e dimensões que podem alcançar até 2mm.</p>		
Aspectos Texturais/Microestruturais:		
Textura geral lepidoblástica, subordinadamente nematoblástica devido aos cristais de quartzo. Contatos retos e irregulares.		

Mineralogia Essencial	% modal	Minerais Acessórios:
Quartzo	35%	Opacos
Flogopita	32%	
Plagioclásio	18%	
K-feldspato	8%	
Calcita	7%	
	Xxx	Minerais Secundários: (indicar de qual mineral provém) Argilominerais (feldspatos); Clorita (biotita).
	Xxx	
	Xxx	
Classificação (grupo I, M, S):		Metamórfica
Nomenclatura:		Cal-Fsp-Phl-Qtz xisto

Data 26 / 05 / 2021

Petrógrafo: **Maylom Ruan Paixão da Silva**

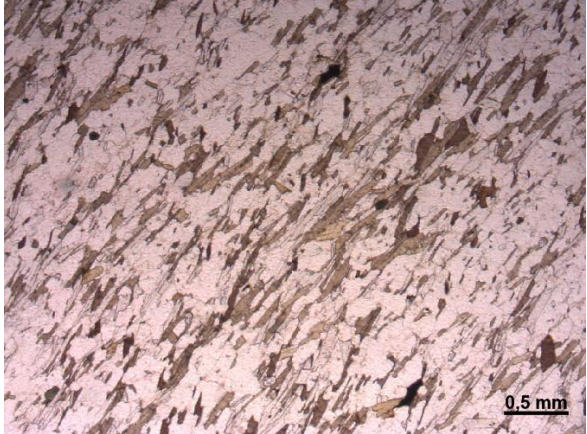
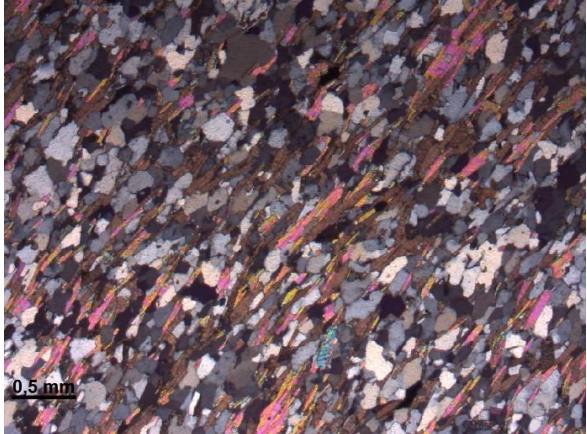
FICHA PETROGRÁFICA		
Sigla da Amostra	MX-01	
Localização (toponímia)	Empresa Minerax, corpo rochoso aflorante na cava leste	
Coordenadas (Lat/Long)	787290	9293946
Descrição (Microscopia Ótica):		Fotomicrografia
<p>A rocha é rica em filossilicatos e exibe orientação mineral preferencial, ressaltada principalmente pelas micas. A mineralogia é determinada pela presença de quartzo, biotita, muscovita, álcali-feldspato e opacos. Os máficos dominantes são principalmente a biotita e opacos, constituindo cerca de 35% da rocha.</p> <p>O quartzo, mineral presente em maior quantidade, apresenta hábito granular e, por vezes, está alongado em uma direção preferencial paralelo a orientação dos filossilicatos. Os cristais são anédricos, com dimensões que variam de 0,1 mm a até 0,8mm e extinção ondulante moderada.</p> <p>A biotita, componente principal da mineralogia de máficos e predominante entre as micas, é composta por cristais subédricos a anédricos, de cor amarelo pálido a marrom e com hábito lamelar orientado. O pleocroísmo é moderado e o mineral pode alcançar exemplares com até 2mm. Ocasionalmente exibe inclusões de zircão.</p> <p>A muscovita está presente como cristais delgados e também orientados segundo uma direção principal, com dimensões de até 1,5mm. O mineral é incolor, composto por cristais subédricos a anédricos e com hábito lamelar.</p> <p>O álcali-feldspato está presente como cristais anédricos e com hábito granular, de dimensões de até 0,2mm. O mineral está recorrentemente alterado para argilominerais, o que dificulta sua caracterização ótica.</p> <p>Os opacos exibem hábito granular e dimensões de até 0,5mm. Os cristais são anédricos e por vezes também estão orientados preferencialmente, ocorrendo associados às biotitas.</p>		 
Aspectos Texturais/Microestruturais:		
Textura geral lepidoblástica, localmente nematoblástica devido aos cristais de quartzo e álcali-feldspato. Contatos retos e irregulares.		

Mineralogia Essencial	% modal	Minerais Acessórios:
Quartzo	28,46 %	Zircão
Biotita	35,29 %	
Muscovita	15,25 %	
Álcali-feldspato	11,88 %	
Opacos	9,12%	Minerais Secundários: (indicar de qual mineral provém)
Xxx	Xxx	Argilominerais
Xxx	Xxx	
Xxx	Xxx	
Xxx	Xxx	

Classificação (grupo I, M, S):	Metamórfica
Nomenclatura:	Kfs-Ms-Bt-Qtz xisto

Data 10 / 05 / 2021

Petrógrafo: Maylom Ruan Paixão da Silva

FICHA PETROGRÁFICA		
Sigla da Amostra	MX-02	
Localização (toponímia)	Empresa Minerax, corpo rochoso aflorante na cava norte	
Coordenadas (Lat/Long)	787092	9294349
Descrição (Microscopia Ótica):		Fotomicrografia
<p>A rocha é rica em filossilicatos e exibe orientação mineral preferencial, ressaltada principalmente pelas micas. A mineralogia é determinada pela presença de quartzo, biotita, muscovita e opacos. Os máficos dominantes são principalmente a biotita e opacos, constituindo cerca de 35% da rocha.</p> <p>O quartzo, mineral presente em maior quantidade, apresenta hábito granular e, por vezes, está alongado em uma direção preferencial paralelo a orientação dos filossilicatos. Os cristais são anédricos, com dimensões que variam de 0,1 mm a até 0,5 mm e extinção ondulante moderada.</p> <p>A biotita, componente principal da mineralogia de máficos e predominante entre as micas, é composta por cristais subédricos a anédricos, de cor amarelo pálido a marrom esverdeado e com hábito lamelar orientado. O pleocroísmo é moderado e o mineral pode alcançar exemplares com até 1,5mm. Ocasionalmente exibe inclusões de zircão.</p> <p>A muscovita está presente como cristais delgados e também orientados segundo uma direção principal, com dimensões de até 1mm. O mineral é incolor, composto por cristais subédricos a anédricos e com hábito lamelar.</p> <p>Os opacos exibem hábito granular e dimensões de até 0,4mm. Os cristais são anédricos e por vezes também estão orientados preferencialmente, ocorrendo associados às biotitas.</p>		 
Aspectos Texturais/Microestruturais:		
Textura geral lepidoblástica, subordinadamente nematoblástica devido aos cristais de quartzo. Contatos retos e irregulares.		

Mineralogia Essencial	% modal	Minerais Acessórios:
Quartzo	43,65 %	Anfibólio
Biotita	34,51 %	
Muscovita	17,28 %	
Opacos	4,56 %	
Xxx	Xxx	Minerais Secundários: (indicar de qual mineral provém)
Xxx	Xxx	xxxx
Xxx	Xxx	
Xxx	Xxx	
Xxx	xxx	

Classificação (grupo I, M, S):	Metamórfica
Nomenclatura:	Ms-Bt-Qtz xisto

Data 10 / 05 / 2021

Petrógrafo: Maylom Ruan Paixão da Silva