

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

**POTENCIAL DA REMINERALIZAÇÃO, EM DIFERENTES
TIPOLOGIAS DE
ARGILA, NA MELHORIA DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO EM SOLOS
AGRÍCOLAS**

**Gregório Zanetti Pollo
Engenheiro Agrônomo**

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

**POTENCIAL DA REMINERALIZAÇÃO, EM DIFERENTES
TIPOLOGIAS DE
ARGILA, NA MELHORIA DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO EM
SOLOS AGRÍCOLAS**

Discente: Gregório Zanetti Pollo

Orientador: Prof. Dr. José Marques Junior

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2025

P776p

Pollo, Gregório Zanetti

Potencial da remineralização, em diferentes tipologias de argilas, na melhoria do ambiente de produção em solos agrícolas. / Gregório Zanetti Pollo. -- Jaboticabal, 2025

70 p.

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

Orientador: José Marques Júnior

1. Mineralogia do solo. 2. Argila. 3. Serviços Ecossistêmicos. I.
Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: POTENCIAL DA REMINERALIZAÇÃO, EM DIFERENTES TIPOLOGIAS DE ARGILA, NA MELHORIA DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO EM SOLOS AGRÍCOLAS

AUTOR: GREGÓRIO ZANETTI POLLO


ORIENTADOR: JOSE MARQUES JUNIOR

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


Prof. Sênior JOSE MARQUES JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **JOSE MARQUES JUNIOR**
Data: 29/07/2025 12:24:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ÉDER DE SOUZA MARTINS (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Ambientais / Universidade de Brasília (UnB) - Brasília/DF

Documento assinado digitalmente
 **EDER DE SOUZA MARTINS**
Data: 30/07/2025 11:40:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **GENER TADEU PEREIRA**
Data: 31/07/2025 12:11:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 23 de julho de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me sustentado com força, sabedoria e fé ao longo de toda esta jornada.

À minha família, pelo incentivo incondicional em todos os momentos. Em especial, ao meu irmão Gustavo e à minha cunhada Andressa, que abriram as portas de sua casa por mais de dois anos, tornando possível a realização deste mestrado em todos os sentidos.

À minha noiva, Bianca, pela paciência, pelo apoio constante e por acreditar em mim mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Diego Siqueira, meu muito obrigado por todo o direcionamento, paciência e apoio durante toda a trajetória.

Manifesto minha profunda gratidão ao *Research Centre for Greenhouse Gas Innovation* (RCGI), à FUSP – Fundação da USP, à Universidade de São Paulo (USP), ao Instituto de Química da USP (IQ) e ao Laboratório de Nanotecnologia e Catálise (LNCat), pelo suporte científico e institucional.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP – Campus Jaboticabal) e à Shell, em nome de Bárbara Samartini e Alexandre Breda, pelo apoio essencial ao desenvolvimento deste projeto. Ao Grupo de Pesquisa Caracterização para Fins de Manejo Específico (CSME), com agradecimentos especiais às pesquisadoras Kathleen, Denise e Mara, pela colaboração dedicada.

Agradeço, também, à MOFTech, à Qunicum, à Agência USP de Inovação, à Agência UNESP de Inovação, à BM Solo, em nome de José Celani e José Henrique, e ao Grupo Pollo, pelo valioso apoio logístico e operacional durante toda a pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este percurso, deixo aqui meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

O presente trabalho investigou o uso de remineralizadores de solo (REM) como insumos de indução pedogenética e regeneração edáfica em solos tropicais contrastantes. A pesquisa teve como eixo central o uso do Índice de Tipologia da Argila (Índice TA), com variação adimensional de 0 a 80, derivado da susceptibilidade magnética (SM), proposto como indicador indireto da tipologia mineralógica do solo. Solos com Índice TA < 10 refletem ambientes mais degradados, com dominância de caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) provenientes de arenito, enquanto solos com Índice TA > 10 apresentam maior expressão de maghemita (Mh) e magnetita (Mt) derivados de basalto. Além dos aspectos edafomineralógicos, o estudo também avaliou a valoração da terra agrícola com base na melhoria mensurável da qualidade do solo, utilizando o Índice TA e o desempenho de atributos críticos ao manejo agrícola. Foram conduzidas três etapas experimentais: (1) avaliação da formação de carbonatos e sequestro de CO₂eq associado à dinâmica do carbono inorgânico após aplicação de REM em solo de Índice TA < 10; (2) ensaio em casa de vegetação com dois Latossolos contrastantes (TA < 10 e TA > 10), submetidos a doses de 0, 3 e 6 t ha⁻¹ de REM, com quatro repetições, avaliando pH, fósforo (P), matéria orgânica (MO), capacidade de troca de cátions (CTC), mineralogia por difração de raios X (DRX), SM e teores de ferro amorfo (Feo) e cristalino (Fed); (3) experimento de campo na cidade de Muzambinho – MG, com aplicação de 12 t ha⁻¹ de REM em 5 ha de Latossolo arenítico (TA < 10), com avaliação espacial da regeneração edáfica via interpolação e mapeamento do Índice TA e atributos do solo. No solo TA < 10, observou-se redução nos teores de P com as doses de REM, possivelmente relacionada à maior mineralização induzida pelo intemperismo acelerado e à adsorção em novas fases minerais. Por outro lado, no solo de TA > 10 houve tendência de aumento do P disponível. As análises mineralógicas nesse solo indicaram aumento significativo do teor de hematita (Hm) e de sua largura à meia altura, indicando maior cristalinidade, além de tendência de redução da goethita (Gt) com aumento no diâmetro médio do cristal (DMC), sugerindo menor potencial de adsorção de P. No solo de TA < 10, observou-se aumento na SM%, indicando formação de minerais pedogenéticos com maior assinatura magnética. No campo, a área com TA > 4 passou de 0,65 ha para 3,5 ha em uma safra, e o mapa de MO revelou incremento de 3,4 ha com teores superiores a 30 g dm⁻³. O total de área regenerada foi estimado em cerca de 2 ha, o que, ajustado ao Valor da Terra Nua local, representa acréscimo de R\$ 11.400,00 por hectare. Conclui-se que (1) a formação de carbonato permitiu estimar o sequestro de 0,18 t CO₂eq por tonelada de REM aplicada; (2) o REM promove efeitos diferenciados tanto na fertilidade quanto nas transformações mineralógicas conforme o Índice TA, e (3) o estudo de campo pôde mensurar espacialmente, em termos qualitativos e quantitativos, a regeneração do solo. O Índice TA consolidou-se como ferramenta útil para diagnosticar e monitorar tais melhorias, viabilizando a valoração econômica de áreas regeneradas e fundamentando políticas públicas de incentivo à remineralização e aos serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Pagamentos Serviços Ambientais; Suscetibilidade Magnética; Mineralogia do Solo; Solos Tropicais; Valoração Econômica; Regeneração do Solo.

ABSTRACT

This study investigated the use of soil remineralizers (REM) as inputs for pedogenetic induction and edaphic regeneration in contrasting tropical soils. The central focus was the use of the Clay Typology Index (TA Index), a dimensionless parameter ranging from 0 to 80, derived from magnetic susceptibility (MS), and proposed as an indirect indicator of soil mineralogical typology. Soils with TA Index < 10 represent more degraded environments, dominated by kaolinite (Ct) and gibbsite (Gb) derived from sandstone, while soils with TA Index > 10 exhibit higher concentrations of maghemite (Mh) and magnetite (Mt) from basaltic parent material. In addition to edaphomineralogical aspects, the study also assessed the economic valuation of agricultural land based on measurable improvements in soil quality, using the TA Index and key attributes related to agronomic management. Three experimental stages were conducted: (1) assessment of carbonate formation and CO₂eq sequestration associated with inorganic carbon dynamics following REM application in soil with TA Index < 10; (2) greenhouse trial using two contrasting Oxisols (TA < 10 and TA > 10), treated with 0, 3, and 6 t ha⁻¹ of REM with four replicates, evaluating pH, available phosphorus (P), soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), mineralogy via X-ray diffraction (XRD), magnetic susceptibility (MS), and contents of amorphous (Fe_o) and crystalline (Fe_d) iron; and (3) field experiment in Muzambinho, Minas Gerais (Brazil), applying 12 t ha⁻¹ of REM to 5 ha of sandstone-derived Oxisol (TA < 10), with spatial assessment of edaphic regeneration through interpolation and mapping of the TA Index and soil attributes. In the TA < 10 soil, P levels decreased with REM application, likely due to enhanced mineralization induced by accelerated weathering and adsorption to newly formed mineral phases. Conversely, in the TA > 10 soil, there was a trend toward increased available P. Mineralogical analysis of this soil showed a significant increase in hematite (Hm) content and full width at half maximum (FWHM), indicating higher crystallinity, along with a reduction in goethite (Gt) and an increase in mean crystal diameter (MCD), suggesting lower P adsorption capacity. In the TA < 10 soil, an increase in MS% was observed, indicating the formation of new pedogenetic minerals with higher magnetic signature. In the field, the area with TA Index > 4 increased from 0.65 ha to 3.5 ha in one crop season, and the SOM map showed an expansion of 3.4 ha with contents above 30 g dm⁻³. The total regenerated area was estimated at approximately 2 ha, which, when adjusted to the regional Land Market Value (LMV), represents a gain of R\$ 11,400.00 per hectare. It was concluded that (1) carbonate formation allowed estimation of 0.18 t CO₂eq sequestration per ton of REM applied; (2) REM promoted distinct effects on soil fertility and mineralogical transformations depending on the TA Index; and (3) the field experiment enabled the spatial assessment—both qualitative and quantitative—of soil regeneration. The TA Index proved to be an effective tool for diagnosing and monitoring such improvements, supporting the economic valuation of regenerated agricultural land and reinforcing public policy initiatives on remineralization and ecosystem service payments.

Keywords: Payments for Environmental Services; Magnetic Susceptibility; Soil Mineralogy; Tropical Soils; Economic Valuation; Soil Regeneration.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Evolução Histórica Da Mineralogia Do Solo: Das Primeiras Observações Aos Métodos E Conceitos Modernos	10
2.2 Remineralizadores De Solo: Fundamentos, Composição E Relevância Agronômica.....	15
2.3 Suscetibilidade Magnética e Índice De Tipologia de Argila: Princípios, Aplicações e Relação com a Remineralização	18
2.4 Valoração Econômica da Melhoria Edáfica	20
3 MATERIAI E MÉTODOS	21
3.1 Caracterização do Índice de Tipologia De Argila Pelo Método de Susceptibilidade Magnética	21
3.2 Desenho Experimental e Estrutura dos Ensaios.....	22
3.4 Primeira Etapa: Pré-ensaio de Intemperismo Acelerado	23
3.5 Segunda Etapa: Experimento em Casa de Vegetação.....	23
3.6 Terceira Etapa: Experimento em Campo.....	25
3.6.1 Caracterização da Área Experimental.....	25
3.6.2 Delineamento e Estratégia Amostral	25
3.6.3 Protocolo de Aplicação e Amostragem	26
3.6.4 Área Controle e Validação Metodológica	26
3.7 Divisão das Análises por Experimento.....	27
3.7.1 Análises Químicas e Físicas	27
3.7.2 Análises Mineralógicas (Experimento de Casa de Vegetação).....	27
3.7.2.1 Óxidos de Ferro Pedogenéticos	28
3.7.2.2 Difratomia de Raios-X (DRX)	28
3.7.2.3 Análises de Suscetibilidade Magnética	29
3.7.2.4 Procedimento Analítico.....	29
3.7.2.5 Indicador de pedogênese: Variação Magnética (SM%).....	29
3.8 Cálculo do Valor Econômico do Solo.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Pré-ensaio de Intemperismo Acelerado.....	32
4.2 Casa de Vegetação	34
4.2.1 Atributos Químicos	34

4.2.1.1 Resultado pH do Solo.....	35
4.2.1.2 Resultado da MO do Solo.....	36
4.2.1.3 Resultado do P disponível do Solo.....	36
4.2.1.4 Resultado da CTC do Solo.....	37
4.2.2 Atributos Mineralógicos e Índice TA.....	37
4.2.2.1 Resultado do Teor de Argila do Solo.....	41
4.2.2.2 Resultado de Ferro Cristalino e Ferro Amorfo.....	41
4.2.2.3 Resultado do Teor Hematita.....	42
4.2.2.4 Resultado do Teor Goethita.....	44
4.2.2.5 Resultado dos Índices Cristalográficos da Ct e Gb.....	46
4.2.2.6 Resultado do Índice TA e Variações na SM%.....	47
4.3 Experimento de Campo.....	49
4.3.1 Proposta de Valoração Econômica das Melhorias nos Atributos do Solo.....	52
4.3.2 Fundamentação e Metodologia de Valoração.....	53
5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	57
ANEXOS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A degradação dos solos representa uma das mais graves ameaças à sustentabilidade global, afetando diretamente a segurança alimentar, a estabilidade climática e o bem-estar humano. Dados recentes da UNESCO (2024) revelam que aproximadamente 75% das terras do mundo já estão degradadas, impactando diretamente 3,2 bilhões de pessoas, com projeções indicando que esse percentual pode atingir 90% até 2050. No contexto brasileiro, essa realidade é particularmente preocupante. Estima-se que mais de 30% dos solos nacionais apresentem algum grau de degradação, comprometendo sua capacidade de sustentar processos ecológicos fundamentais. Em escala global, os impactos econômicos associados à degradação do solo já superam US\$ 400 bilhões anuais (WORLD BANK, 2024).

Uma das estratégias emergentes frente à degradação do solo é o uso de remineralizadores (REM), popularmente conhecidos como “pó de rocha” sendo caracterizados por serem “produtos de origem mineral que sofreram apenas moagem mecânica e que atuam na fertilidade do solo por meio da liberação gradual de elementos benéficos às plantas”. (MAPA, 2016). Esses materiais são aplicados diretamente no solo para sua remineralização e, os minerais primários que os constituem, ao sofrer o processo de intemperismo formam minerais secundários e liberam íons que são importantes para nutrição de plantas, originam cargas permanentes, além de promover melhorias físicas e biológicas no ambiente (MAPA, 2016). Por utilizarem insumos geológicos locais e possuírem baixa pegada ambiental, os REM se enquadram nas chamadas Soluções Baseadas na Natureza (SbN), promovendo práticas agrícolas de menor dependência externa e maior alinhamento à sustentabilidade ambiental (Manning et al., 2015; Burbano, 2022).

Entretanto, a eficácia dos REM depende fortemente das características do solo que os recebe. A mineralogia da fração argila é especialmente importante, pois controla a adsorção de íons, a estabilidade dos coloides e os processos de transformação mineral (Sant’Ana et al., 2024; Luchese et al., 2021). A eficácia da aplicação de REM, portanto, não pode ser avaliada de forma generalista, sendo necessário considerar as propriedades mineralógicas do solo.

Dentre os métodos disponíveis para avaliar a mineralogia da fração argila, destaca-se a suscetibilidade magnética (SM), que tem se consolidado como uma ferramenta diagnóstica eficiente. A partir dos valores brutos de SM, foi desenvolvido

o Índice de Tipologia de Argila (Índice TA), uma inovação metodológica protegida pela patente brasileira BR 10 2020 023042-1, representando a primeira aplicação deste conceito em dissertações acadêmicas (GRAVENA, 2023). O Índice TA é calculado por algoritmos que processam dados de SM e os convertem em uma escala adimensional de 0 a 80, sintetizando a proporção relativa dos minerais da fração argila e sua associação com o ambiente de formação. Valores menores que 10 ($TA < 10$) caracterizam solos derivados de arenito, com predominância de caulinita e gibbsita, enquanto valores maiores que 10 ($TA > 10$) indicam solos de basalto ricos em magnetita e maghemita (Camargo et al., 2014; Camargo & Marques Júnior et al., 2020).

Práticas que promovem a recomposição mineralógica e funcional do solo ampliam sua resiliência e restauram serviços ecossistêmicos essenciais, como o sequestro de carbono e a regulação hídrica. Esses benefícios, muitas vezes invisibilizados em avaliações econômicas tradicionais, vêm sendo reconhecidos por abordagens de valoração ambiental (Dominati et al., 2010; Bartkowski et al., 2020). No Brasil, a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA) (Lei nº 14.119/2021) cria oportunidades para remunerar práticas agrícolas sustentáveis, como a remineralização, não apenas pela produção, mas também pela conservação do solo como ativo ecológico estratégico. Nesse sentido, práticas como a remineralização, avaliadas sob o ponto de vista mineralógico e funcional, passam a integrar agendas técnicas e políticas voltadas à sustentabilidade do uso da terra.

Contudo, faltam metodologias consolidadas para quantificar economicamente os benefícios da remineralização, limitando a estruturação de políticas de incentivo e programas de pagamento por serviços ambientais (ABREFEN, 2020; Silva; Melo, 2022).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar a formação de minerais secundários em diferentes Índices TA submetidos à aplicação de REM, destacando a interação entre a composição mineralógica dos REM, as características da fração argilosa e as variações detectáveis por meio da SM. Para isso, propõe-se: (i) monitorar os processos de pedogênese e transformação mineralógica por meio de análises de SM e difração de raios X (DRX); (ii) correlacionar essas transformações com alterações nos atributos físico e químicos e mineralógicos do solo; e (iii) desenvolver uma proposta de valoração econômica baseada na

quantidade de área que teve os atributos do solo melhorados e correlacionar essa quantidade com o Valor da Terra Nua (VTN) ajustado a quantidade de solo regenerada.

A hipótese que orienta este trabalho é que a aplicação direcionada de REM, ajustada à mineralogia da fração argilosa, pode induzir a formação de minerais secundários capazes de estabilizar estruturas coloidais, intensificar a retenção de matéria orgânica (MO) e modular a disponibilidade de elementos químicos, refletindo-se em variações detectáveis por SM e DRX. Essas transformações, ao restaurarem a funcionalidade do solo, possuem valor ecológico e econômico mensurável, contribuindo para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes, regenerativos e alinhados às diretrizes da sustentabilidade.

A metodologia adotada contempla três abordagens complementares: um pré ensaio de intemperismo acelerado para avaliar a o acréscimo de carbono no solo proveniente da aplicação direta do REM; um experimento em casa de vegetação, conduzido com solos de Índice TA < 10 e Índice TA > 10 sob condições controladas; e um experimento em campo, realizado em área agrícola com solo de Índice de TA < 10 no município de Muzambinho (MG), comparando solos de área agrícola cultivados com milho e áreas de mata nativa adjacente. Serão avaliados atributos químicos e físico como pH, matéria orgânica (MO) fósforo (P), capacidade de troca catiônica (CTC), teor de argila e mineralógicos como DRX, ferro amorfo (Feo), ferro cristalino (Fed) e SM. Para cada experimento foi realizado um tipo de análises estatísticas adequadas a cada conjunto de dados. A valoração econômica será realizada com base no VTN ajustado e em estimativas de massa de solo impactada, compondo um modelo simplificado de precificação dos serviços ecossistêmicos associados à remineralização.

Com essa abordagem integrada, o estudo busca contribuir para a compreensão das relações entre mineralogia, funcionalidade edáfica e regeneração de serviços ambientais, validando o Índice TA como ferramenta diagnóstica de apoio ao manejo sustentável do solo em regiões tropicais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evolução Histórica Da Mineralogia Do Solo: Das Primeiras Observações Aos Métodos E Conceitos Modernos

O entendimento mineralógico dos solos começou a se consolidar no final do século XIX com a distinção entre minerais primários, herdados da rocha-mãe, e minerais secundários, formados por transformações pedogenéticas. Essa diferenciação foi essencial para desvincular o solo de uma visão meramente geológica e estabelecer seu caráter como um corpo natural autônomo. Entre os pioneiros desse paradigma estavam Vasily Dokuchaev, considerado o pai da pedologia moderna, e Hans Jenny, que sistematizou os fatores formadores do solo (Jenny, 1941). A identificação de minerais como quartzo, feldspatos e micas na fração arenosa e silte representou um dos primeiros marcos da mineralogia do solo, especialmente em regiões de clima temperado, onde esses minerais persistem em maior proporção (Brady & Weil, 2016).

Durante a primeira metade do século XX, os estudos focaram predominantemente nos silicatos primários, como ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, pela sua importância como fontes potenciais de nutrientes em solos jovens. Esses minerais, ricos em K^+ , Ca^{2+} e Na^+ , eram avaliados, sobretudo, quanto à sua resistência ao intemperismo químico, e sua relação com a fertilidade potencial dos solos (Kämpf & Curi, 2012). Contudo, essa abordagem era limitada, pois ignorava a presença dominante de minerais secundários em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos, cuja mineralogia é dominada por caulinita (Ct), gibbsita (Gb) e óxidos de ferro como hematita (Hm) e goethita (Gt). A adaptação de modelos temperados ao contexto tropical brasileiro exigiu uma revisão profunda do entendimento mineralógico aplicado à pedogênese tropical (Melo et al., 2001; Schaefer et al., 2008).

Com o avanço do conhecimento sobre a importância da fração fina, especialmente em solos tropicais, passou-se a incorporar o conceito de coloides à ciência do solo. Em 1908, o químico russo Konstantin Gedroiz foi um dos primeiros a aplicar o termo ao reconhecer que partículas coloidais desempenhavam papel fundamental na capacidade de troca de cátions e na dinâmica de fertilidade dos solos (Gedroiz, 1908). Posteriormente, Gordon (1922) e Bouyoucos (1927) contribuíram com interpretações que conectavam a presença dos coloides à estrutura do complexo sortivo, destacando a importância dessa fração para o comportamento químico do solo. Esse entendimento representou um avanço conceitual, deslocando o foco do

estudo apenas da fração grosseira para os constituintes mais finos, com grande relevância na reatividade do solo.

Nesse contexto, a DRX representou uma revolução metodológica a partir da década de 1950, ao permitir a identificação precisa de minerais com base na sua estrutura cristalina, mesmo em frações argilosas menores que 2 μm . A técnica, originalmente aplicada na física da matéria condensada, foi rapidamente adaptada para as ciências do solo, especialmente com o trabalho de Moore & Reynolds (1997), cuja obra se tornou referência mundial em identificação de argilominerais. A DRX possibilitou distinguir minerais com estruturas 1:1 como Ct e 2:1 (como esmectita e vermiculita), além de identificar impurezas, empacotamentos irregulares e transformações mineralógicas em horizontes distintos do perfil.

A base teórica da DRX está ancorada na lei de Bravais, que descreve os 14 tipos de reticulados espaciais possíveis em estruturas cristalinas, e na lei de Bragg, formulada por W. H. Bragg e W. L. Bragg em 1913. Esta última expressa matematicamente as condições para difração construtiva com a equação $n\lambda = 2d \sin \theta$, onde λ é o comprimento de onda da radiação, d é o espaçamento entre planos cristalinos e θ é o ângulo de incidência (Bragg & Bragg, 1913). Essas leis permitiram à ciência do solo ultrapassar a análise morfológica ou química simples e incorporar uma abordagem cristalográfica rigorosa, viabilizando a associação entre estrutura, formação e reatividade mineral dos solos tropicais (Bigham et al., 2002).

Entre os anos 2000 e 2010, consolidou-se o conceito de pedoindicadores, atributos ou minerais do solo capazes de indicar estágios específicos da evolução pedogenética. A presença e a proporção relativa entre Ct, Gb, Hm e Gt passaram a ser interpretadas como indicadores da maturidade dos perfis, especialmente em ambientes intensamente intemperizados. Além da DRX, métodos espectrais como espectroscopia no infravermelho e técnicas magnéticas começaram a ser empregados para ampliar a sensibilidade e precisão na caracterização mineralógica (Bigham et al., 2002; Schaefer et al., 2008). Essa fase marcou uma transição da abordagem descritiva para uma leitura funcional da mineralogia como ferramenta diagnóstica da pedogênese tropical.

Paralelamente, a espectroscopia no infravermelho próximo e médio (IV) consolidou-se como ferramenta complementar à DRX, sendo capaz de identificar grupos OH e ligações cristalinas em argilominerais com sensibilidade elevada.

Estudos demonstraram que bandas específicas no IV, próximas a 500–700 e 920 nm, associadas a ferro (Hm e Gt), correlacionam-se diretamente com a intensidade do intemperismo mineral (USGS, 2017). A combinação de sinais IR com padrões DRX fortaleceu a interpretação funcional da mineralogia, pois permitiu discriminar estágios de evolução dos solos com base na distribuição de grupos OH e módulos cristalográficos.

Além disso, os métodos de extração química seletiva, especialmente o protocolo ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) passaram a ser amplamente adotados para quantificar separadamente o Fed e o Feo em solos tropicais (McKeague & Day, 1966; Loeppert & Inskeep, 1996). Esses métodos, validados por Schwertmann & Taylor (1989) e Loeppert (2008), passaram a ser referência para avaliar frações reativas do ferro e correlacioná-las com atributos como retenção de P, carbonatação e estrutura do solo.

Finalmente, os primeiros avanços na aplicação da assinatura magnética dos solos ganharam destaque técnico: técnicas como SM, ressonância de Mössbauer e medidas de estabilidade térmica passaram a ser utilizadas para caracterizar formas de ferro metastável (como ferrihidrito e maghemitas pedogênicas), diretamente associados a processos de intemperismo e formação dos horizontes (Cooper et al., 2021). Esses métodos passaram a ser vistos como ferramentas de baixo custo e alta capacidade diagnóstica, abrindo espaço para a tipologia de argila baseada em assinaturas magnéticas, que é tema dos próximos tópicos.

Ainda no início dos anos 2000, o Grupo de Pesquisa CSME da UNESP Jaboticabal foi um dos primeiros no mundo a demonstrar a variabilidade espacial dos minerais da fração argila em solos tropicais, revelando sua influência direta em processos agrícolas e ambientais como erosão, compactação (Cortez et al., 2011), e na produtividade de culturas como cana-de-açúcar, café e citrus (Baldo et al., 2014; Catalan et al., 2016).

As contribuições lideradas por Marques Júnior et al. (2010) introduziram metodologias baseadas na integração entre atributos mineralógicos e dados de SM, utilizando análises geoestatísticas e sensoriamento indireto para delimitação de zonas de manejo. Essa abordagem permitiu a inferência funcional de propriedades edáficas latentes como reatividade coloidal, estágio de intemperismo e potencial de retenção

de nutrientes a partir de proxies mineralógicos. Com isso, a SM passou a ser reconhecida como uma ferramenta diagnóstica promissora.

Antes mesmo da consolidação da SM como técnica operacional, já se empregavam métodos avançados como espectroscopia Mössbauer e análise termogravimétrica (ATG) para caracterizar as fases de ferro pedogênicas e inferir estados evolutivos do solo. No entanto, é com a SM que a ciência do solo alcançou um método de alta resolução, baixo custo e aplicabilidade prática em larga escala para inferência mineralógica funcional (Cooper et al., 2021). Essa técnica passou a ocupar um papel central no diagnóstico da gênese e maturidade dos solos, revelando-se essencial na construção de um novo vocabulário técnico, que incluiu os conceitos de “DNA do solo”, “assinatura magnética” e, finalmente, “Índice TA”.

É importante esclarecer que o Índice de Tipologia de Argila (Índice TA) se refere à identificação da composição mineralógica dos minerais com diâmetro inferior a 0,002 mm, incluindo Hm, Gt, Gb e Ct e minerais magnéticos como Maghemita (Mh), Magnetita (Mt) e ferrihidrita (Fh) que expressam os processos pedogenéticos dominantes. O termo não se refere ao tipo físico de argila (como textura ou granulometria), mas à natureza cristalográfica e funcional desses minerais. O Índice TA, por sua vez, representa uma métrica derivada da SM, que sintetiza a proporção relativa desses minerais em uma amostra e sua associação com o ambiente de formação (ex: ambientes redutores ou oxidativos). Essa inovação foi sistematizada e protegida pela primeira patente brasileira dedicada à quantificação da gênese dos solos por via magnética, registrada sob o número BR102020023042B1 (GRAVENA, 2023). O Índice TA passou a ser aplicado na delimitação de zonas de manejo e na predição de atributos funcionais dos solos, consolidando-se como ferramenta diagnóstica de alta sensibilidade. Para organizar cronologicamente o desenvolvimento dos estudos de mineralogia, apresenta-se a Tabela 1, com os dados relevantes dos períodos.

Tabela 1 - Linha do tempo histórica das principais contribuições para o estudo mineralógico e pedológico dos solos, destacando o desenvolvimento de técnicas e conceitos aplicados à caracterização mineralógica, especialmente em solos tropicais.

Período	Evento / Contribuição	Referências / Observações
Final do século XIX	Distinção entre minerais primários e secundários. Solo passa a ser compreendido como corpo natural autônomo.	Vasily Dokuchaev; Hans Jenny (1941)

Início do século XX	Aplicação do conceito de colóides aos solos e início dos estudos da fração coloidal.	Gedroiz (1908); Gordon (1922); Bouyoucos (1927)
Primeira metade do século XX	Foco nos silicatos primários. Avaliação da resistência ao intemperismo e da fertilidade potencial dos solos jovens.	Kämpf & Curi (2012); Brady & Weil (2016)
Década de 1950	Consolidação da difração de raios X (DRX) para identificação cristalográfica de minerais argilosos.	Bragg & Bragg (1913); Moore & Reynolds (1997); Bigham et al. (2002)
Segunda metade do século XX	Revisão dos modelos temperados para o contexto tropical. Ênfase em minerais secundários como caulinita, gibbsita e óxidos de ferro.	Melo et al. (2001); Schaefer et al. (2008)
Anos 2000–2010	Introdução dos pedoindicadores (ex: proporção de caulinita, gibbsita, hematita e goethita) como marcadores de evolução pedogênica.	Bigham et al. (2002); Schaefer et al. (2008); José Marques Junior
Anos 2000 em diante	Expansão de técnicas espectrais (infravermelho) na identificação de grupos OH e ligações cristalinas.	USGS (2017)
A partir de 2000	Ampliação do uso de extrações seletivas (DCB) para quantificação de Fe cristalino (Fed) e amorfo (Feo).	McKeague & Day (1966); Loeppert & Inskeep (1996); Schwertmann & Taylor (1989)
Anos 2010–2020	Consolidação da análise magnética dos solos: susceptibilidade magnética, Mössbauer, estabilidade térmica.	Cooper et al. (2021)
Atualidade (2020–2025)	Aplicação da SM como ferramenta de diagnóstico mineralógico e desenvolvimento do Índice de Tipologia da Argila (ITA). Classificação por zonas de manejo e simulação de níveis TRL.	QUANTICUM (2023) Patente BR102020023042B1; José Marques Junior

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2 Remineralizadores De Solo: Fundamentos, Composição E Relevância Agronômica

A definição legal de REM foi estabelecida no Brasil por meio da Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2016), segundo a qual se trata de materiais naturais, provenientes da moagem de rochas, aplicados ao solo com a finalidade de fornecer nutrientes às plantas e melhorar características físicas e químicas do solo. Para que possam ser utilizados legalmente, os REM devem estar registrados no MAPA, possuir granulometria adequada (preferencialmente inferior a 0,3 mm), laudo de composição química (óxidos totais) e mineralógica, além de comprovar sua origem e eficiência agronômica. Esses critérios são essenciais para assegurar que o material apresente reatividade suficiente para liberação de nutrientes e interação efetiva com a matriz do solo.

Nesse contexto, dois fatores se destacam como determinantes da eficiência agronômica dos REM: a granulometria e a composição mineralógica. Partículas mais

finas aumentam a superfície de contato entre os minerais e os agentes de intemperismo, favorecendo a liberação de nutrientes. Do ponto de vista mineralógico, são preferíveis minerais pertencentes ao início da série de reação de Bowen (como olivina, piroxênios e anfibólios) e plagioclásios cálcicos, por sua maior susceptibilidade ao intemperismo químico (Martins et al., 2023).

A diversidade litológica dos REM registrados no Brasil é ampla, incluindo basaltos, fonolitos, flogopitas, melilitos, micaxistos e granitos, cada qual com características químicas e mineralógicas distintas (Silveira et al., 2021; Conceição et al., 2022). No entanto, a eficiência do uso agrônômico está diretamente relacionada à compatibilidade entre o material aplicado e o solo receptor. Ajustes de dose com base apenas na textura do solo (como o teor de argila) e nas exigências nutricionais são insuficientes. É fundamental considerar a mineralogia já presente no solo para evitar redundâncias ou antagonismos que comprometam a eficácia do insumo (Marques Júnior et al., 2014; Siqueira et al., 2024).

Estudos indicam que a aplicação de REM pode promover transformações positivas na dinâmica físico-química do solo, com melhorias no pH, na CTC, na atividade microbiana e na retenção hídrica (Conceição et al., 2022; Cardoso et al., 2018). A interação com microrganismos do solo, como fungos micorrízicos e bactérias solubilizadoras, intensificam a dissolução de minerais e a ciclagem de nutrientes, contribuindo para a regeneração de solos degradados (Dong et al., 2020). A presença de substâncias húmicas também pode potencializar esses efeitos, como demonstrado por Dourado (2022), ao favorecer a solubilização de silicatos e a agregação do solo.

Contudo, a composição mineral dos REM pode interferir em processos específicos da dinâmica dos nutrientes. Estudos demonstram que minerais acessórios, como os óxidos de ferro, influenciam diretamente processos como a adsorção de P. Isso reforça a importância de caracterizar não apenas os teores de macro e micronutrientes, mas também os minerais acessórios presentes nas rochas aplicadas (Fink et al., 2019).

Além dos avanços científicos, observa-se um crescimento expressivo do setor de REM no Brasil. Segundo levantamento da Revista Novo Solo (2024), o número de empresas registradas junto ao MAPA passou de 23 em 2019 para 37 em 2022, com destaque para os estados de Minas Gerais, Goiás e São Paulo. Entre 2019 e 2021, a produção nacional de REM cresceu de 1,5 para 3 milhões de toneladas, consolidando

o país como referência global no desenvolvimento e uso dessa tecnologia. Em 2024, o Brasil passou a liderar iniciativas internacionais de remoção de carbono por intemperismo acelerado (enhanced rock weathering – ERW), utilizando REM aplicados em larga escala para captura de CO₂ atmosférico em solos tropicais (Revista Novo Solo, 2025).

Por fim, para reforçar a distinção entre práticas frequentemente adotadas de forma inadequada e abordagens técnicas embasadas em critérios mineralógicos, granulométricos e estratégicos de aplicação, apresenta-se na Tabela 2 uma comparação detalhada entre esses dois extremos. Enquanto a aplicação incorreta se baseia em análises superficiais e resultados insatisfatórios, a aplicação científica assegura a eficiência agronômica e o retorno financeiro esperado. Essa diferenciação evidencia a importância de selecionar REM registrados no MAPA, com granulometria fina (inferior a 0,3 mm), composição mineralógica favorável — preferencialmente minerais do início da Série de Bowen — e ajuste das doses conforme a mineralogia do solo, superando o critério simplista baseado apenas na textura. Tal abordagem otimiza a liberação de nutrientes, maximiza a resposta do solo e contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos tropicais.

Tabela 2 - Comparação entre práticas incorretas e boas práticas na aplicação de REM em solos tropicais, destacando critérios mineralógicos, granulométricos e estratégicos que impactam a eficiência agrônômica e a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Fonte: Produção do próprio autor.

Aspecto	Aplicação Baseada em Análises Incompletas (Prática Incorreta)	Boas Práticas Baseadas em Ciência e Resultados (Aplicação Técnica)
Critério Principal	Foco exclusivo nos óxidos totais da rocha (ex: K ₂ O, CaO, MgO)	Análise mineralógica da rocha e do solo receptor
Exemplo Clássico	Ardósia com 4–6% de K ₂ O: potássio presente em minerais altamente estáveis (Quartzo).	Preferência por minerais do início da Série de Bowen
Consequência	Liberação lenta e baixa capacidade de regeneração de solo.	Novas formações de minerais secundários e maior disponibilização de nutrientes
Granulometria	Partículas > 0,3 mm (baixa reatividade)	Partículas < 0,3 mm (alta reatividade e liberação de nutrientes)
Registro no MAPA	Produto não registrado ou informal	Rocha registrada no MAPA, com laudos de óxidos totais e mineralógicos
Critério de Aplicação	Baseado em análises nutricionais e física do solo	Baseado na mineralogia do solo, com possibilidade de mapas de taxa variável
Posicionamento no Campo	Aplicação uniforme, sem considerar mineralogia ou intemperismo	Aplicação estratégica em solos pobres em minerais reativos (ex: caulinita, quartzo)
Resultado Agrônômico	Baixo retorno; descrédito da tecnologia	Maior produtividade, retorno financeiro e sustentabilidade

Nota: Comparação entre práticas empíricas e técnicas na aplicação de REM, destacando a importância da análise mineralógica, da granulometria adequada e do posicionamento estratégico no campo. Boas práticas aumentam a eficiência agrônômica, promovem a formação de minerais secundários e contribuem para a sustentabilidade dos solos tropicais.

2.3 Suscetibilidade Magnética e Índice De Tipologia de Argila: Princípios, Aplicações e Relação com a Remineralização

As técnicas geofísicas aplicadas à avaliação de solos, como a condutividade elétrica e a resistividade elétrica, foram inicialmente desenvolvidas em ambientes de solos temperados, onde apresentam resultados consistentes na caracterização da umidade, salinidade e densidade. Contudo, sua aplicação em solos tropicais enfrenta limitações relevantes, principalmente devido à interferência da variabilidade na concentração de água e sais dissolvidos, comprometendo a sensibilidade dessas técnicas à variabilidade mineralógica (Silva Júnior & Granemann, 2010).

Em contrapartida, a SM tem se destacado como uma técnica altamente específica e precisa, com mínima interferência ambiental. Fundamentada na detecção

da resposta magnética de partículas minerais submetidas a um campo magnético alternado, a SM permite inferir indiretamente a composição mineralógica da matriz edáfica. A técnica mede três tipos principais de resposta magnética — paramagnetismo, diamagnetismo e ferrimagnetismo — determinados pela distribuição eletrônica dos minerais. Assim, é sensível à presença de óxidos de ferro como Mt, Mh, Hm, Gt e Gb comuns em solos tropicais altamente intemperizados (Dearing, 1999; Swoboda, 2016).

Historicamente, a SM foi subestimada no Brasil. Durante as décadas de 1980 e 1990, pedólogos utilizavam a atração magnética como critério empírico para distinguir solos derivados de arenito e basalto, sob a suposição de que solos não atraídos por ímãs eram desprovidos de propriedades magnéticas relevantes. Essa perspectiva começou a ser revista com os estudos conduzidos por Mauro Rezende (1985), orientado por Udo Schwarzmann na Alemanha, que retomaram a aplicação da SM como ferramenta diagnóstica em solos tropicais. Posteriormente, os avanços promovidos por pesquisadores como Vidal Barrón e pela introdução de protocolos sistematizados no Brasil consolidaram a SM como uma técnica promissora para inferência mineralógica e avaliação do grau de pedogênese em Latossolos (Barrón et al., 1999; Torrent et al., 2007).

A SM se diferencia de outras técnicas por não sofrer interferência direta de fatores ambientais como umidade, MO ou sais solúveis, tornando-se especialmente eficaz em ambientes tropicais complexos (Silva et al., 2015; Matias et al., 2010). Seu reconhecimento institucional foi reforçado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, 2020), que incluiu a SM entre as tecnologias mais disruptivas desenvolvidas no Brasil nas últimas seis décadas.

A aplicação da SM na monitoria de transformações edáficas decorrentes da remineralização também tem avançado. Swoboda (2016) observou que, após aplicação de REM silicatada, houve incremento na SM, atribuído à liberação de ferro de minerais primários e à pedogênese de Mt. Ramos et al. (2020) complementam, afirmando que essas alterações são indetectáveis por métodos químicos tradicionais, mas captadas por variações sutis da SM. Martins et al. (2021) confirmam correlações positivas entre SM e teores de P, MO e CTC em solos cultivados com milho.

Estudos recentes demonstram que a SM responde de forma diferenciada à mineralogia do solo. Sant’Ana e Siqueira (2024) mostraram respostas mais intensas

em solos com maior proporção de illita e Mt, e mais discretas em solos dominados por Hm e Ct. Pereira et al. (2015) observaram formação diferenciada de Hm e Gt após aplicação de REM, conforme o tipo de solo.

O Índice TA, inferida pela SM, tem se mostrado eficaz para classificar a reatividade mineral dos solos, sendo aplicada na delimitação de zonas de manejo (Basei et al., 2023; Oliveira et al., 2015). Solos de Índice TA > 10 são responsivos a REM ricos em ferro e alumínio; solos de Índice TA < 10, dominados por Ct e Gt, respondem melhor à aplicação combinada de REM e condicionadores orgânicos (Vasconcelos & Marcante, 2020).

Para que essa abordagem baseada no Índice TA seja amplamente adotada, é fundamental superar desafios estruturais, como a escassez de mapeamentos mineralógicos, a baixa difusão técnica da metodologia e a carência de políticas públicas específicas. Nesse sentido, de Mello Monte et al. (2021) destacam a necessidade de fortalecer redes técnico-científicas, investir em capacitação e criar incentivos institucionais para fomentar práticas sustentáveis de manejo.

2.4 Valoração Econômica da Melhoria Edáfica

A qualidade edáfica representa um estoque de capital natural essencial, responsável pela provisão de diversos serviços ecossistêmicos, incluindo o fornecimento de nutrientes, a regulação hídrica e o sequestro de carbono. Dominati, Patterson e Mackay (2010) propuseram um arcabouço conceitual que integra propriedades do solo, processos biogeoquímicos e fluxos de serviços, permitindo quantificar economicamente os benefícios associados à regeneração e manutenção da funcionalidade edáfica

No campo da Economia dos Recursos Ambientais, a melhoria edáfica pode ser enquadrada dentro do conceito de Valor Econômico Total (VET), que contempla componentes de uso (direto, indireto e de opção) e de não uso (existência e legado). Revisões brasileiras recentes destacam cinco principais métodos de valoração aplicáveis ao solo: Custo Evitado, Custo de Reposição, Produtividade Marginal, Preços Hedônicos e Valoração Contingente. Tais abordagens possibilitam capturar desde benefícios privados, como o aumento da produtividade agrícola, até bens públicos, como a mitigação da erosão e o sequestro de carbono (Constantino, 2018).

Entretanto, levantamento sistemático conduzido por Bartkowski et al. (2020) revela que apenas uma fração dos serviços ecossistêmicos do solo vem sendo

monetizada e que, entre os métodos aplicados, predominam aqueles baseados em custos. Isso limita a inserção efetiva dos resultados em políticas públicas e mecanismos de incentivo. Os valores monetários, quando calculados, variam amplamente: Sandhu et al. (2008) reportaram valores entre US\$ 1.270 e 19.420 ha⁻¹ ano⁻¹ em sistemas convencionais e orgânicos na Nova Zelândia, enquanto Bhola & Malhotra (2019) estimaram entre US\$ 64 e 111 ha⁻¹ ano⁻¹ em regiões arroyeiras da Índia. Essas discrepâncias refletem não apenas variações metodológicas, mas também diferenças nos contextos edafoclimáticos e na abrangência dos serviços considerados.

No Brasil, a promulgação da Lei nº 14.119/2021 instituiu a PNPSA, reconhecendo expressamente a “manutenção, recuperação ou melhoria da fertilidade dos solos” como um serviço passível de remuneração. Casos práticos têm adotado métricas como erosão evitada e custo de oportunidade da terra para precificar intervenções conservacionistas. Em um estudo conduzido na sub-bacia do Rio Turvo (MG), estimou-se um benefício potencial de R\$ 450 ha⁻¹ ano⁻¹ para propriedades que aderem a programas de PSA voltados ao controle da erosão (Silva, 2025).

Nesse contexto, práticas como a aplicação de REM, especialmente aqueles ricos em minerais primários reativos, têm sido valorizadas não apenas pelo aporte de nutrientes, mas principalmente por sua capacidade de induzir processos pedogenéticos de rejuvenescimento do solo. A presença de minerais como piroxênios, anfibólios e feldspatos cálcicos favorece reações de intemperismo acelerado, promovendo a pedogênese de argilominerais e óxidos de ferro, essenciais para a reestruturação da fração coloidal e recuperação da funcionalidade (MANNING, 2010). A aplicação de REM pode reativar processos de formação de solo, aumentando a estabilidade estrutural e a capacidade de retenção de água e nutrientes ao longo do tempo. Essa abordagem amplia o conceito de fertilidade edáfica ao integrar funções de regeneração e resiliência dos sistemas agrícolas tropicais.

3 MATERIAI E MÉTODOS

3.1 Caracterização do Índice de Tipologia De Argila Pelo Método de Susceptibilidade Magnética

Neste trabalho, um dos métodos para a avaliação da composição mineralógica do solo foi por meio da técnica de SM, utilizando sensor da marca Bartington. A partir dos resultados brutos de SM, os dados são processados e convertidos no Índice TA

que, atualmente, está sob a patente BR102020023042B1 (Gravena, 2023). A escala do Índice TA varia de 0 a 80 (adimensional), onde valores menores que 10 ($TA < 10$) caracterizam solos derivados de material de origem tipicamente de arenitos, com mineralogia da fração argila dominada por Ct e Gb. Valores maiores que 10 ($TA > 10$) indicam solos derivados de material de origem tipicamente de basaltos, com presença significativa de Mt, Mh e Hm na fração argila. Esta classificação tem se mostrado consistente com análises mineralógicas por DRX e análises químicas de ferro total e livre (Basei et al., 2023). Neste trabalho, iremos abordar solos nessas duas classes.

3.2 Desenho Experimental e Estrutura dos Ensaios

Este estudo foi conduzido em três etapas complementares, organizadas de forma progressiva para simular o avanço da tecnologia de remineralização em solos tropicais, desde os primeiros testes de reatividade até a validação em campo. A estrutura seguiu o conceito de Níveis de Prontidão Tecnológica (Technology Readiness Levels – TRL), desenvolvido por Mankins (1995), que classifica o grau de maturidade de uma tecnologia em nove níveis, da pesquisa básica (TRL 1) até a aplicação consolidada (TRL 9).

A primeira etapa, correspondente aos níveis TRL 2–3, consistiu em um ensaio laboratorial de bancada, sem plantas, voltado à avaliação da reatividade química inicial do REM e de seu impacto nas frações de carbono do solo. Em seguida, foi realizado um experimento em casa de vegetação (TRL 4–5), com ambiente controlado, para analisar as alterações em atributos químicos, físicos e mineralógicos após aplicação do REM. Por fim, um ensaio de campo (TRL 6–8) foi conduzido em área de cultivo de milho, com validação dos efeitos em condições reais de manejo agrícola.

3.3 Caracterização do REM

O REM utilizado foi extraído de ortognaisses de composição básica cálcio-alcalina de idade Neoproterozoica, 643 milhões de anos (Basei et. al., 1995). A análise físico-química confirmou baixos níveis de metais pesados (As, Cd, Hg e Pb), abaixo dos limites da IN 5/2016 do MAPA. A granulometria mostrou que 100% das partículas estavam abaixo de 0,3 mm, sendo classificado como Filler. A mineralogia é formada por 83% de minerais de elevada reatividade (54,8% andesina, 20,1% actinolita, 5,6% biotita, 2,3% apatita), 9,8% de minerais de baixa reatividade (8,4% ortoclásio, 1,4%

microclínio), e 6,1% de quartzo como mineral de muito baixa reatividade, conforme classificação de Martins et al. (2023). Os principais óxidos identificados foram: SiO₂ (51,27%), Al₂O₃ (16,03%), Fe₂O₃ (9,12%), TiO₂ (1,59%), CaO (7,20%), MgO (4,96%) e P₂O₅ (1,15%). O produto foi cadastrado e legalizado no MAPA como REM de solo (Nº.: MG 002155-5.000001). Os laudos técnico-analíticos completos do REM são apresentados em anexo.

3.4 Primeira Etapa: Pré-ensaio de Intemperismo Acelerado

Foram analisadas quatro amostras do solo com Índice TA < 10, além de uma amostra de quartzo puro, utilizada como branco analítico para controle de qualidade. O branco analítico foi utilizado para verificar a presença de contaminantes e não deveria exceder três vezes o limite de detecção do método. A amostra número 4 teve suas análises repetidas para estimativa da precisão analítica, adotando-se o conceito de curva de precisão de Thompson (1988), com critérios validados em um nível de confiança de 99,73%. A incerteza da medição foi estimada com base em um nível de significância de 5%, determinando o limite de repetitividade.

As amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas, moídas em moinho de aço e peneiradas a 150 mesh. Foram realizadas três análises distintas para determinar as fases do carbono: carbono total (Ct), quantificado por combustão seca com detecção por infravermelho não dispersivo (NDIR), conforme descrito por Nelson e Sommers (1996); carbono orgânico (Corg), determinado após pré-tratamento ácido com HCl 1 mol L⁻¹ e filtração, método baseado na remoção do carbono inorgânico seguido de quantificação por combustão (Soil Survey Staff, 2014); e carbono elementar (Cele), obtido por digestão ácida seguida de calcinação em mufla a alta temperatura, metodologia adaptada de Wiedemeier et al. (2015) para frações termicamente resistentes. O carbono carbonático (Ccar) foi calculado pela diferença entre Ct e Corg, conforme proposto por Wang et al. (2012).

3.5 Segunda Etapa: Experimento em Casa de Vegetação

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), em Jaboticabal, SP, Brasil 91 (21°14'47.24"S; 48°17'45.00"O). O período experimental decorreu de 15 de março a 4 de maio de 2024, totalizando 50 dias, com temperatura mantida em média de 32 °C

e umidade do solo ajustada à capacidade de campo por meio de irrigações regulares e monitoramento diário.

Foram utilizados dois solos para esse experimento. O primeiro, um Latossolo Vermelho distrófico de textura média e classificado com Índice de TA < 10 e um Latossolo Vermelho eutrófico muito argiloso classificado com Índice TA > 10.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos: controle, 3,0 t ha⁻¹ de REM e 6,0 t ha⁻¹ de REM, aplicados aos dois tipos de solos mencionados, ambos cultivados com milho. As doses utilizadas foram definidas com base nas comercialmente utilizadas. Cada tratamento teve quatro repetições, totalizando 12 vasos por tipo de solo, preenchidos com 9 kg de terra seca. Para evitar perdas de material, o solo de cada vaso foi isolado com saco plástico.

Os dados foram organizados por solo e tratamento e submetidos inicialmente ao teste de homogeneidade de variância de Levene, para verificar a similaridade das variâncias entre os grupos, seguido do teste de normalidade de Shapiro-Wilk, aplicado individualmente a cada grupo com pelo menos três observações para avaliar a adequação do uso de testes paramétricos. Para as variáveis que apresentaram homogeneidade de variância e distribuição normal, foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA). Caso essas condições não fossem atendidas, optou-se pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. As variáveis que apresentaram diferenças estatisticamente significativas na ANOVA, considerando um nível de significância ampliado de 10% ($p \leq 0,10$), foram submetidas ao teste de comparações múltiplas de Tukey (HSD), também com nível de significância de 10% ($\alpha = 0,10$), a fim de identificar quais pares de tratamentos diferiram entre si.

A adoção do nível de significância de 10% justifica-se pela curta duração do experimento e pelo número limitado de repetições, condições que podem reduzir o poder estatístico dos testes tradicionais. Este critério mais liberal visa aumentar a sensibilidade da análise, permitindo identificar tendências que podem ser relevantes para futuras investigações, especialmente em estudos exploratórios. Todos os resultados foram organizados em tabelas e planilhas eletrônicas contendo estatísticas descritivas, resultados dos testes de Levene, normalidade, ANOVA ou Kruskal-Wallis e as comparações múltiplas de Tukey para as variáveis significativas. As análises foram implementadas por meio de scripts em Python, utilizando as bibliotecas pandas, scipy.stats e statsmodels.

3.6 Terceira Etapa: Experimento em Campo

3.6.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento da terceira etapa foi realizado na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, em Muzambinho, sudoeste de Minas Gerais, Brasil (21°19'13.94"S; 46°35'17.85"O). Os solos de maiores ocorrências na área de estudo são Argissolos Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho distrófico de textura média. A região é formada por rochas metamórficas de origem sedimentar (paragnaisses) e de origem ígnea (ortognaisses) do Pré-Cambriano (Heilbron et al., 2004; Trouw et al., 2013). O Índice TA do solo na camada de 0–20 é da ordem de $TA < 10$, mantendo características pedológicas consistentes com a etapa anterior. A região apresenta clima tropical de altitude, com precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média anual de 20°C.

Figura 1 – Localização da área de estudo no município de Muzambinho, MG.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Mapa indicando a localização da área experimental (Fazenda Nossa Senhora Aparecida) no município de Muzambinho, sudoeste de Minas Gerais

3.6.2 Delineamento e Estratégia Amostral

A área experimental de 5,0 hectares, destinada à produção de silagem de milho no sistema de verão, foi selecionada dentro de uma propriedade rural de 150 hectares. A abordagem metodológica adotada baseou-se em estudo observacional de campo, sem delineamento experimental formal, seguindo princípios estabelecidos para avaliação de práticas agrícolas em condições reais de produção (Doran; Parkin, 1994; Karlen et al., 1997).

Esta estratégia metodológica é amplamente reconhecida na literatura científica para estudos de monitoramento ambiental e avaliação de impactos de práticas de

manejo em escala de propriedade rural (Reeves, 1997; Schoenholtz et al., 2000). A ausência de delineamento experimental controlado é justificada pela necessidade de avaliar a efetividade da remineralização em condições reais de campo, onde múltiplos fatores interagem de forma complexa, proporcionando maior representatividade dos resultados para aplicação prática (Doran; Zeiss, 2000; Andrews et al., 2004).

3.6.3 Protocolo de Aplicação e Amostragem

O protocolo experimental envolveu duas aplicações de REM na dose de 6,0 t ha⁻¹: a primeira aplicação realizada no início do experimento e a segunda após nove meses da aplicação inicial. As coletas de solo foram realizadas em dois períodos estratégicos: (i) três meses após a primeira aplicação e (ii) doze meses após a aplicação inicial, permitindo avaliar tanto efeitos de curto quanto de médio prazo da remineralização.

A estratégia amostral seguiu metodologia de amostragem composta proporcional, conforme estabelecido por Siqueira et al. (2010), que demonstraram a eficiência desta abordagem para caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo em áreas agrícolas. Foram coletados cinco pontos amostrais na área agrícola, cada um composto por dez subamostras sistematicamente distribuídas em um raio de 10 metros, totalizando 50 subamostras por coleta. Esta densidade amostral (1 amostra composta por hectare) atende aos critérios estabelecidos pela literatura para estudos de monitoramento de qualidade do solo em escala de propriedade (USDA-NRCS, 2014; Karlen et al., 2003).

3.6.4 Área Controle e Validação Metodológica

Como referência comparativa, foram coletadas oito amostras compostas de solo em área de mata nativa do bioma Cerrado, adjacente à área experimental. A utilização de ecossistemas nativos como controle constitui metodologia amplamente validada na literatura científica, uma vez que estas áreas representam sistemas estáveis com mínima interferência antrópica e características edáficas próximas ao estado original do solo (Lal, 2015; Brady; Weil, 2016).

Esta abordagem metodológica é reconhecida por programas de monitoramento ambiental, incluindo protocolos da CETESB para estabelecimento de valores de referência de qualidade do solo, que utilizam remanescentes nativos para distinguir alterações provocadas por ação antrópica (CETESB, 2014). A proximidade espacial

entre a mata nativa e a área cultivada (< 500 m) permite controlar variáveis ambientais como clima, topografia e mineralogia, aumentando a confiabilidade das comparações (Doran; Parkin, 1994; Schoenholtz et al., 2000).

A normalidade dos dados foi verificada mediante teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$). As comparações entre solos da área cultivada e da mata nativa foram realizadas por testes t independentes para dados paramétricos ou teste de Mann-Whitney para dados não-paramétricos ($\alpha = 0,05$). Os resultados foram expressos em médias \pm desvio padrão, com representação gráfica dos intervalos de confiança de 90%.

3.7 Divisão das Análises por Experimento

3.7.1 Análises Químicas e Físicas

As análises químicas e física foram realizadas em ambos os experimentos, seguindo metodologias padronizadas para caracterização da fertilidade do solo. O pH foi determinado em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na proporção 1:2,5 (solo:solução), conforme metodologia da Embrapa (2017). O fósforo disponível foi extraído pelo método resina e quantificado por colorimetria (Teixeira et al., 2017).

A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley-Black modificado, baseado na oxidação do carbono orgânico por dicromato de potássio em meio ácido (Yeomans; Bremner, 1988). A capacidade de troca catiônica efetiva foi calculada pela soma dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) e acidez trocável (Al^{3+}), determinados por extração com KCl 1 mol L^{-1} (Teixeira et al., 2017).

No experimento de casa de vegetação, foi adicionalmente determinado o teor de argila pelo método da pipeta, após dispersão química com NaOH 1 mol L^{-1} e agitação mecânica por 16 horas (Gee; Bauder, 1986).

3.7.2 Análises Mineralógicas (Experimento de Casa de Vegetação)

As análises mineralógicas foram realizadas exclusivamente no experimento de casa de vegetação, visando caracterizar detalhadamente as transformações mineralógicas induzidas pela remineralização. Estas análises incluíram a quantificação de óxidos de ferro pedogenéticos, caracterização mineralógica por DRX e determinação de Índices cristalográficos.

3.7.2.1 Óxidos de Ferro Pedogenéticos

Os teores de ferro total dos óxidos pedogenéticos foram determinados por extração com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), seguindo a metodologia clássica de Mehra e Jackson (1960). Este método permite a dissolução seletiva de óxidos de ferro cristalinos, incluindo hematita, goethita e maghemita, fornecendo informações sobre o conteúdo total de ferro pedogenético presente no solo.

Complementarmente, os teores de ferro referentes aos óxidos de baixa cristalinidade foram extraídos por solução de oxalato de amônio (Feo), conforme metodologia adaptada de Camargo et al. (1986). Esta extração é específica para formas de ferro pouco cristalinas, como ferridrita e óxidos de ferro recém-formados, permitindo avaliar processos de neoformação mineral.

A razão Feo/Fed foi calculada como indicador do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro, onde valores menores indicam maior cristalinidade e estabilidade dos minerais formados (Schwertmann, 1985).

3.7.2.2 Difractometria de Raios-X (DRX)

A caracterização mineralógica da fração argila foi realizada por DRX, utilizando difratômetro Mini-Flex II Rigaku equipado com cátodo de cobre, filtro de níquel e radiação $K\alpha$ (20 mA, 30 kV). A preparação das amostras seguiu protocolo específico para maximizar a identificação e quantificação dos minerais de interesse.

Inicialmente, a fração argila foi separada das demais frações granulométricas pelo método de centrifugação diferencial, conforme Jackson (1985). Para eliminar interferências dos óxidos de ferro na identificação dos argilominerais, as amostras foram submetidas ao tratamento com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), seguindo Mehra e Jackson (1960), e posteriormente peneiradas em malha de 0,10 mm.

As lâminas para análise foram confeccionadas com material em pó (sem orientação preferencial) para permitir a identificação e quantificação adequada dos minerais. A velocidade de varredura empregada foi de $1^\circ 2\theta$ /minuto, com amplitude de 23 a $49^\circ 2\theta$ para caracterização de hematita e goethita, e de 11 a $19^\circ 2\theta$ para Ct e Gb.

A quantificação relativa dos minerais foi realizada através da integração das áreas dos picos característicos. Para Ct e Gb, foi calculada a razão $Ct/(Ct+Gb)$

empregando as áreas dos reflexos da Ct (001) a 7,2 Å e da Gb (002) a 4,85 Å, conforme metodologia estabelecida por Kämpf e Schwertmann (1982).

3.7.2.3 Análises de Suscetibilidade Magnética

A SM foi determinada em ambos os experimentos, porém com diferentes níveis de detalhamento. No experimento de casa de vegetação, foram realizadas medições em baixa e alta frequência para cálculo de parâmetros magnéticos específicos, enquanto no experimento de campo foi medida apenas a SM em baixa frequência para monitoramento das transformações mineralógicas.

3.7.2.4 Procedimento Analítico

As medições foram realizadas em 10 g de terra fina seca ao ar (TFSA), utilizando equipamento Bartington MS2 acoplado ao sensor Bartington MS2B. No experimento de casa de vegetação, as avaliações foram conduzidas em duas frequências: baixa frequência (SMBF = 0,47 kHz) e alta frequência (SMAF = 4,7 kHz), conforme protocolos estabelecidos por Dearing (1994) e Costa et al. (1999).

3.7.2.5 Indicador de pedogênese: Variação Magnética (SM%)

Exclusivamente no experimento de casa de vegetação, foi calculada a SM dependente da frequência SM (%), parâmetro que auxilia na identificação de partículas superparamagnéticas no solo. Este Índice é calculado pela fórmula:

$$SM (\%) = 100 \times (SM Hf - SM Lf) / SM Lf$$

Onde:

- SM Lf = suscetibilidade magnética em baixa frequência
- SM Hf = suscetibilidade magnética em alta frequência

Segundo Dearing (1999), a medida da SM especialmente a sua variação com a frequência SM (%) — é altamente sensível e capaz de detectar variações extremamente sutis na cristalinidade de amostras de solo que contenham minerais pedogenéticos com propriedades magnéticas distintas. Minerais com maior grau de cristalização, e, portanto, com maior LMA, tendem a apresentar baixa SM dependente

da frequência, sendo mais facilmente identificados por técnicas como a DRX. Por outro lado, minerais com alta variação magnética, alta SM (%), geralmente possuem tamanho de grão nanométrico e baixa cristalinidade, o que os torna praticamente invisíveis a métodos tradicionais como DRX, mas detectáveis por medições magnéticas.

Essas partículas magnéticas ultrafinas, conhecidas como superparamagnéticas, possuem tamanhos inferiores a aproximadamente $0,03 \mu\text{m}$ (30 nm), e perdem rapidamente sua magnetização induzida devido à energia térmica natural — comportamento típico de magnetismo instável, mas com elevada suscetibilidade. A presença dessas partículas pode ser diagnosticada com alta sensibilidade por meio da medição da SM em diferentes frequências, sendo esta uma ferramenta valiosa para identificar minerais pedogenéticos formados em baixas concentrações e tamanhos reduzidos. Logo, a variação magnética representa uma medida ideal para expressar de forma qualitativa e quantitativa os indicadores da pedogênese (Dearing, 1999).

De acordo com Maher (1988), a SM apresenta clara dependência do tamanho dos grãos de Mt. Grãos superparamagnéticos possuem SM (%) elevada e comportamento fortemente dependente da frequência de medição, ao contrário dos grãos maiores, como os de domínio único estável (SSD), pseudo-domínio único (PSD) ou multidomínio (MD). Já Heider et al. (1996) demonstraram que, em Mt sintéticas com tamanhos entre $0,09$ a $6000 \mu\text{m}$, a SM Lf mantém-se relativamente estável ($\sim 596 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg} \pm 77 \times 10^{-6}$), exceto quando os grãos são menores que $0,03 \mu\text{m}$, faixa na qual o comportamento superparamagnético se intensifica e os valores de suscetibilidade aumentam consideravelmente. Valores de SM (%) entre 2-10% indicam menor presença de partículas superparamagnéticas, enquanto valores superiores a 10% sugerem predominância de grãos ultrafinos de Mt ou Mh (Dearing, 1999). Esta análise fornece informações valiosas sobre os processos pedogenéticos e a composição mineralógica da fração argila, permitindo detectar transformações sutis na mineralogia magnética do solo.

Varição magnética (%SM)	Interpretação
< 2,0	Praticamente nenhuma (<10%) partícula superparamagnética (SP) - minerais pedogenéticos acima de 30 nm
2,0 – 10,0	Mistura de partículas SP menores que 0,005 µm (5 nm) (entre 10 e 75%) com partículas maiores não-SP
10,0 – 14,0	Praticamente todas (>75%) as partículas são superparamagnéticas (SP) menores do que 30 nm, podendo chegar a 5 nm - Pode ser associada a maior taxa de pedogênese e minerais de baixa cristalinidade
> 14,0	Valores raros, alta presença de minerais SP em escala nanométrica ou minerais pedogenéticos afetados pelo efeito do fogo

Figura 1. Faixas de variação magnética relativa (%SM) e suas interpretações com base na proporção de partículas superparamagnéticas (SP) no solo, associadas à pedogênese, tamanho dos minerais e possíveis efeitos térmicos.

3.8 Cálculo do Valor Econômico do Solo

A valoração econômica das melhorias edáficas foi estruturada com base no conceito de capital natural do solo, utilizando como referência o VTN estabelecido pela Receita Federal do Brasil, 2024. O VTN representa o valor de mercado do imóvel rural desprovido de benfeitorias, culturas ou pastagens, constituindo um proxy confiável para o capital natural, uma vez que seu valor está intrinsecamente relacionado à capacidade produtiva e qualidade do solo (Pereira et al., 2015).

Esta abordagem metodológica não visa avaliar ganhos diretos de produtividade, mas sim quantificar a valorização do capital natural do solo, convertendo melhorias edáficas em valor monetário tangível e defensável para aplicação em PSA.

A quantificação da área regenerada foi realizada através de análise geoespacial utilizando mapas de interpolação gerados pelo método do Inverso do Quadrado da Distância (IDW - Inverse Distance Weighting). Este método foi selecionado por sua capacidade de estimar valores em locais não amostrados com base na proximidade e similaridade dos pontos conhecidos, sendo adequado para dados de solo com distribuição espacial relativamente homogênea (Webster; Oliver, 2007).

Os mapas foram gerados para cada atributo avaliado (pH, P, MO, CTC e Índice TA) nos anos de 2023 e 2024. A área considerada como regenerada foi determinada

pela diferença entre os dois períodos, identificando regiões onde houve incremento nos atributos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pré-ensaio de Intemperismo Acelerado

A aplicação de REM em um Latossolo Vermelho originado de arenito, com Índice TA < 10 e predominância de Ct, além de menor concentração de Gb e Mh, resultou em variações significativas nos teores de carbono orgânico, carbono elementar e carbono carbonático após um ciclo de milho de 90 dias. Observou-se uma leve redução no teor de carbono orgânico com o aumento da dose de REM de 3 t ha⁻¹ para 6 t ha⁻¹, passando de 1,54% para 1,50%, representando uma diferença de 0,04%.

Esse resultado pode estar relacionado à dinâmica do intemperismo acelerado da rocha, onde a interação entre minerais e MO influencia processos de mineralização e estabilização do carbono (Zamanian et al., 2016; Manning et al., 2024). Essa diferença foi resultado do valor médio da dose de 6 t ha⁻¹ para dose de 3 t ha⁻¹, portanto um feito adicional de 3 t ha⁻¹ por hectare, tendo a menor dose como controle.

O pré-ensaio foi realizado dessa forma pois faz parte de um projeto temático maior com dados confidenciais. O carbono elementar apresentou uma redução de 0,08% para 0,05%, uma diferença de 0,03%, sugerindo que parte desse carbono pode ter sido oxidada ou incorporada a outras formas estáveis (Nelson; Sommers, 1996). O aumento do carbono carbonático de 0,63% para 0,67% indica que parte do CO₂ capturado pode ter sido estabilizado na forma de carbonatos secundários (Zamanian et al., 2016).

A variação total de carbono entre as doses foi de 2,25% para 2,22%, resultando em uma diferença de 0,03%. Comparando com a taxa de sequestro esperada para rochas basálticas, que pode atingir 4,5 t CO₂eq. para cada 10 t ha⁻¹ de rocha aplicada, a rocha gnáissica utilizada neste experimento apresentou um comportamento distinto (Manning et al., 2024). Considerando os valores obtidos e assumindo que a conversão para carbono capturado ocorreu de forma proporcional à variação do carbono carbonático, a taxa de captura de CO₂ para a rocha gnáissica foi estimada em aproximadamente 1,8 t CO₂eq. para cada 10 t ha⁻¹ de REM aplicado, o que equivale

a 0,18 t CO₂eq./t REM ou 0,18 kg CO₂eq./kg de REM aplicada. Em comparação, a rocha basáltica possui uma taxa de 0,45 kg CO₂eq./kg de rocha aplicada, indicando que a eficiência da gnáissica foi cerca de 40% da capacidade da basáltica.

No entanto, a proposta deste estudo não é afirmar qual REM é melhor ou pior, mas sim demonstrar que cada REM pode ter uma estratégia de uso distinta. A escolha do tipo de REM e do ambiente em que será aplicada pode definir seu papel tanto na captura de CO₂ quanto nos benefícios adicionais ao solo e às culturas agrícolas (Trumper et al., 2009).

O carbono capturado via intemperismo acelerado de REM é uma estratégia fundamental para mitigação climática, pois apresenta um menor risco de ser reemitido à atmosfera em comparação com estoques de carbono em vegetação, como florestas que podem ser perdidas em eventos de incêndios (Trumper et al., 2009).

Além de sequestrar carbono e armazená-lo por mais tempo na estrutura mineral na forma de carbono associado, o processo de intemperismo também gera novos minerais secundários sem carbono em sua composição (Zamanian et al., 2016). Esses minerais, especialmente óxidos de ferro e alumínio, têm a capacidade de proteger o carbono orgânico já presente no solo, dificultando a ação de reações químicas e microrganismos responsáveis por sua degradação (Manning et al., 2024). Esse efeito pode aumentar significativamente os estoques de carbono no solo, além de proporcionar melhorias nas funções ambientais do solo, contribuindo para a fertilidade e a resiliência dos ecossistemas agrícolas (Teixeira et al., 2017).

Com base nos resultados deste estudo e na publicação recente da edição da revista Novo Solo da ABREFEN, que apontou que quase 40 mil toneladas de REM gnáissico foram produzidas no Brasil e canceladas pelo MAPA, pode-se estimar o potencial de sequestro de CO₂ associado a esse volume. Considerando a taxa de captura obtida neste estudo de 0,18 t CO₂eq./t REM, o total de CO₂ potencialmente sequestrado pelo uso dessas 40 mil toneladas de rocha gnáissica seria de aproximadamente 7,2 mil toneladas de CO₂eq.

Esse valor reforça a importância dos REM como estratégia complementar para mitigação das mudanças climáticas e gestão sustentável dos solos agrícolas, demonstrando que diferentes tipos de REM podem ter aplicações específicas e contribuir de maneira diversificada para o sequestro de carbono e a melhoria da qualidade do solo (Trumper et al., 2009; Manning et al., 2024).

4.2 Casa de Vegetação

A presente seção detalha os impactos da aplicação de REM sobre os atributos químicos, físico e mineralógicos de dois Latossolos de Índice TA < 10 e TA > 10 ambos em casa de vegetação.

A normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$). Apenas três combinações tratamento-solo apresentaram violação da normalidade: Teor de Argila no solo de Índice TA > 10 (6 t ha⁻¹ REM), relação e teor de argila no solo TA > 10 (6 t ha⁻¹ REM), relação (Ct)/(Ct+Gb) no controle e DMC Gt 111 6 t ha⁻¹ REM. Para verificar a robustez dos testes paramétricos aplicados, realizou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney para essas comparações. Os dados estão dispostos nas planilhas anexas

4.2.1 Atributos Químicos

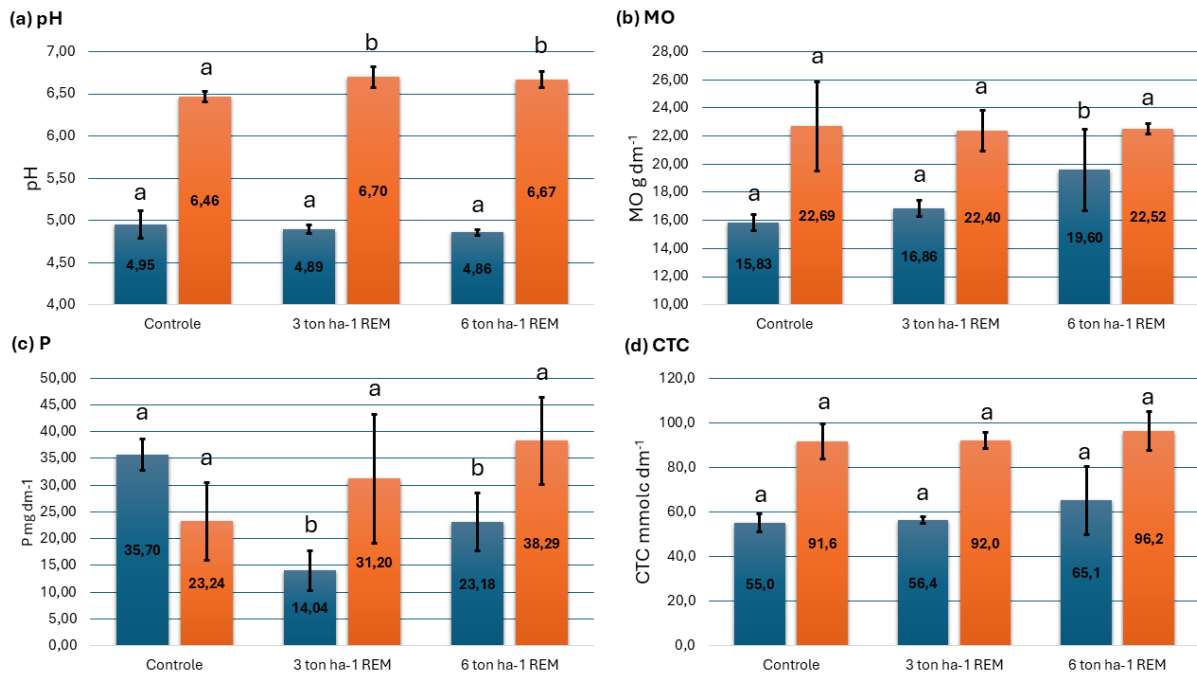
A presente seção detalha os impactos da aplicação de REM sobre os atributos químicos de dois Latossolos de Índice TA < 10 e TA > 10 ambos em casa de vegetação.

Para complementar a visualização gráfica (Figura 2) as Tabelas 3 e 4, em anexo, reúnem os resultados detalhados dos testes estatísticos aplicados. Os dados apresentados nessas tabelas correspondem às análises de variância (ANOVA) ou ao teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, conforme a adequação aos pressupostos estatísticos para cada variável e tipo de solo. Quando os testes indicaram diferenças significativas, foram aplicados os testes post hoc de Tukey para identificar quais tratamentos diferiram entre si. As tabelas incluem as estatísticas dos testes (valores de F ou χ^2), os p-valores correspondentes, os níveis de significância expressos por ns não significativo e * para significativos e um resumo dos resultados desses testes.

A Figura 2 apresenta, para cada grupo de solo, as médias e os desvios-padrão dos principais atributos químicos avaliados, incluindo pH, MO, P disponível, CTC. Além disso, a Figura 2 inclui a indicação com letras de significância para observar as diferenças entre os tratamentos, com base nos testes post hoc realizados após a análise inicial.

Figura 2 – Médias \pm desvio padrão dos atributos químicos do solo de Índice TA > 10 e Índice TA < 10 submetidos a doses de REM





Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: pH, matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P) e capacidade de troca catiônica (CTC) em solos de Índice TA < 10 (azul) e Índice TA > 10 (laranja) após aplicação de 0, 3 e 6 t ha⁻¹ de REM. Letras indicam diferenças pelo teste de Tukey (p ≤ 0,10) entre tratamentos no mesmo solo. Barras de erro: desvio padrão (n = 4).

4.2.1.1 Resultado pH do Solo

A aplicação do REM apresentou efeitos distintos sobre o pH do solo nos diferentes solos analisados (Figura 2a). No solo de TA < 10, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Por outro lado, no solo de Índice TA > 10, observou-se diferença entre as duas dosagens de REM para o controle, indicando que a aplicação favoreceu a elevação do pH nesse ambiente (Figura 2a). Nos solos de Índice TA < 10, a ausência de mudanças significativas pode ser explicada pela baixa capacidade-tampão desses solos, que limita o efeito da liberação de bases (Silva et al., 2022).

A elevação do pH do solo é uma resposta frequentemente observada com a aplicação de REM, porém, o mecanismo responsável por essa alteração difere daquele promovido pela calagem. Enquanto o calcário neutraliza a acidez do solo devido à dissolução de carbonatos de cálcio e magnésio, os REM atuam de maneira indireta, favorecendo a remoção de íons H⁺ do solo à medida que os silicatos sofrem intemperismo (Souza et al., 2018; Toscani e Campos, 2017; Melo et al., 2012; Silva et al., 2012; 352 Ribeiro et al., 2010).

4.2.1.2 Resultado da MO do Solo

Em relação MO, observou-se um aumento significativo apenas com a dose de 6,0 ha⁻¹ de REM em comparação ao controle no solo de Índice TA < 10 (Figura 2b). Este comportamento sugere uma dose ótima de REM para o estímulo da atividade microbiana ou para a estabilização da MO em complexos organominerais em médio a longo prazo, favorecendo a estabilização do carbono orgânico ao longo do tempo (Dong et al., 2020).

Além disso, estudos recentes publicados na revista Nature Geoscience demonstram que a aplicação de REM de solo pode induzir a formação de minerais secundários com baixa cristalinidade e elevada superfície específica, os quais promovem a estabilização térmica da MO do solo ao reduzir sua exposição à decomposição microbiana (Rowe et al., 2024).

4.2.1.3 Resultado do P disponível do Solo

No solo de Índice TA < 10, o teor de P apresentou uma redução significativa em ambas as doses de REM, chegando a uma diminuição de até 64% na dose de 3 ton ha⁻¹ quando comparado com o controle (Figura 2c). A liberação desse nutriente por REM é lenta e depende do intemperismo químico e biológico pois a dissolução dos minerais e a disponibilização do P aumentam com a fragmentação das partículas (Silva et al., 2017). Além disso, Martins et al. (2023) ressaltam que essa liberação demanda tempo para disponibilizar o P na solução do solo.

No solo de Índice TA > 10, observou-se um aumento expressivo de P disponível, porém sem diferença significativa entre os tratamentos (Figura 2c). Em estudo conduzido em plantações de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, foi encontrado que a SM, aqui descrita como TA > 10, apresenta correlação significativa com o P adsorvido. Os autores destacaram que solos com maior Índice TA também apresentavam maior capacidade de retenção de P (Peluco et al., 2015). Essa elevada quantidade de P retido, pode estar sendo geo-disponibilizada pela dissolução de íons de silício do REM que competem com o sítio de adsorção do P, assim como o descrito por Schaller et al (2024).

Outro fator que possa ter ocasionado essa maior disponibilidade de P é o teor de Gt total no solo TA > 10 ter reduzido significativamente (Figura 3j). Essa relação é

coerente com os resultados apresentados por Fink et al. (2019), que demonstraram que solos com maior conteúdo de Gt apresentaram maior capacidade de adsorção de P. Assim, a diminuição da fração cristalina desse óxido, promovida pela aplicação de REM, pode ter reduzido a densidade de sítios ativos para adsorção, resultando em maior concentração de P disponível na solução do solo.

4.2.1.4 Resultado da CTC do Solo

A aplicação de REM impactou positivamente a CTC nos solos estudados, com maior resposta no solo de Índice TA < 10 em doses de 6 t ha⁻¹ (Figura 2d).

Em solos tropicais manejados, a formação de compostos organo-minerais, resultante da interação entre silicatos e matéria orgânica, pode contribuir para a elevação da CTC ao longo do tempo (Martins et al., 2023).

4.2.2 Atributos Mineralógicos e Índice TA

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nas análises físicas e mineralógicas dos solos estudados. Os dados foram obtidos por DRX, complementados por medidas da LMA e do DMC, a fim de avaliar alterações na cristalinidade dos principais minerais. Foram analisadas as concentrações de Hm e Gt por extrações seletivas, permitindo uma interpretação integrada entre mineralogia qualitativa e quantitativa. Além disso, foram realizadas as análises do SM dos solos e a variações entre as frequências de leitura.

Os resultados foram organizados conforme o Índice TA e as doses de REM, e submetidos a testes estatísticos para verificar a significância das alterações observadas.

As análises foram conduzidas por meio de Análise de Variância (ANOVA) ou do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, conforme a adequação aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias. Quando os testes indicaram diferenças significativas ($p \leq 0,10$), foram realizados testes post hoc de Tukey para identificar as comparações entre tratamentos. Os níveis de significância são indicados por letras que se distinguem entre si caso haja diferença significativa. As tabelas complementares (Tabela 5 e 6) detalham as estatísticas dos testes, valores de p, níveis de significância e resultados dos testes post hoc, acompanhados dos comentários para os solos de Índice TA < 10 e Índice TA > 10 respectivamente.

As análises dos atributos mineralógicos e magnéticos dos solos de Índice TA < 10 e Índice TA > 10 revelaram alterações significativas após a aplicação do REM. Os resultados detalhados dessas transformações são apresentados nas Figuras 3 a Figura 7. Para garantir a clareza e a legibilidade de todos os gráficos, as figuras foram distribuídas em páginas sequenciais.

Figura 3 - Médias \pm desvio padrão dos atributos físico, mineralógicos e magnéticos do solo submetidos a doses de REM.

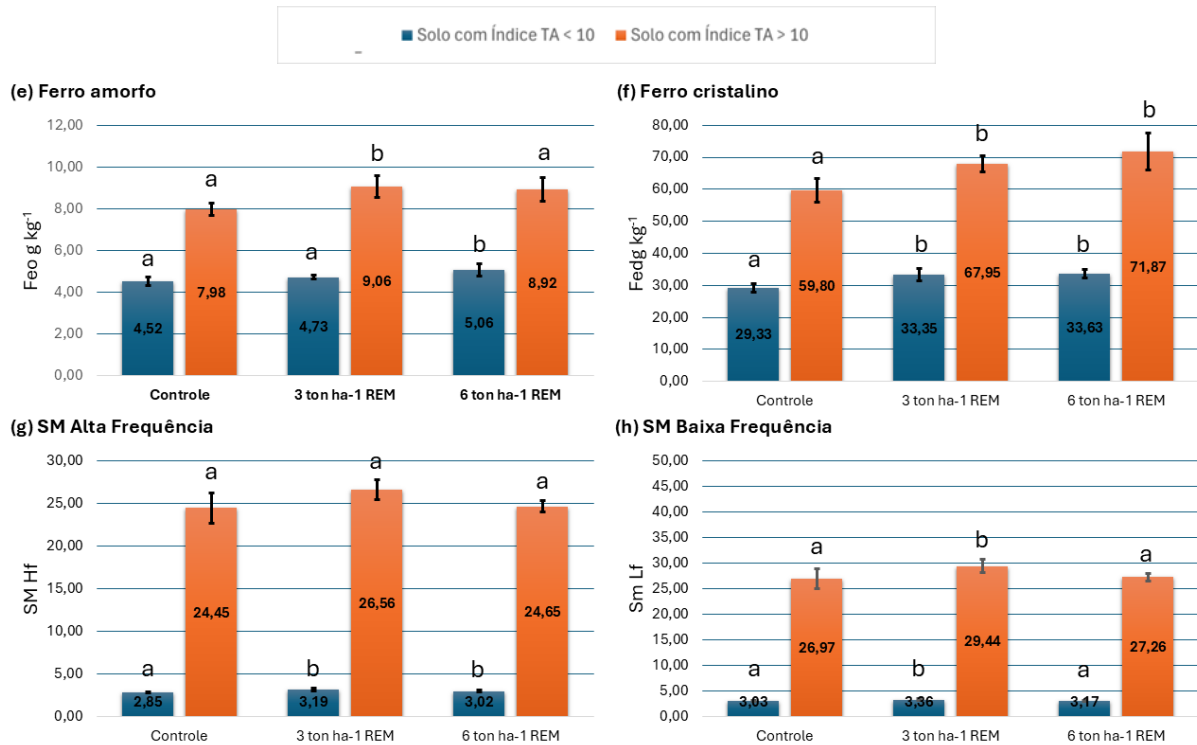


Figura 3. Teores de ferro amorfo (Feo), ferro cristalino (Fed), e SM em alta (Hf) e baixa frequência (Lf) em solos de Índice TA < 10 e Índice TA > 10 após aplicação de REM. Letras diferentes indicam diferenças pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Barras de erro: desvio padrão ($n = 4$).

Figura 4 - Médias \pm desvio padrão dos atributos físico, mineralógicos e magnéticos do solo submetidos a doses de REM.



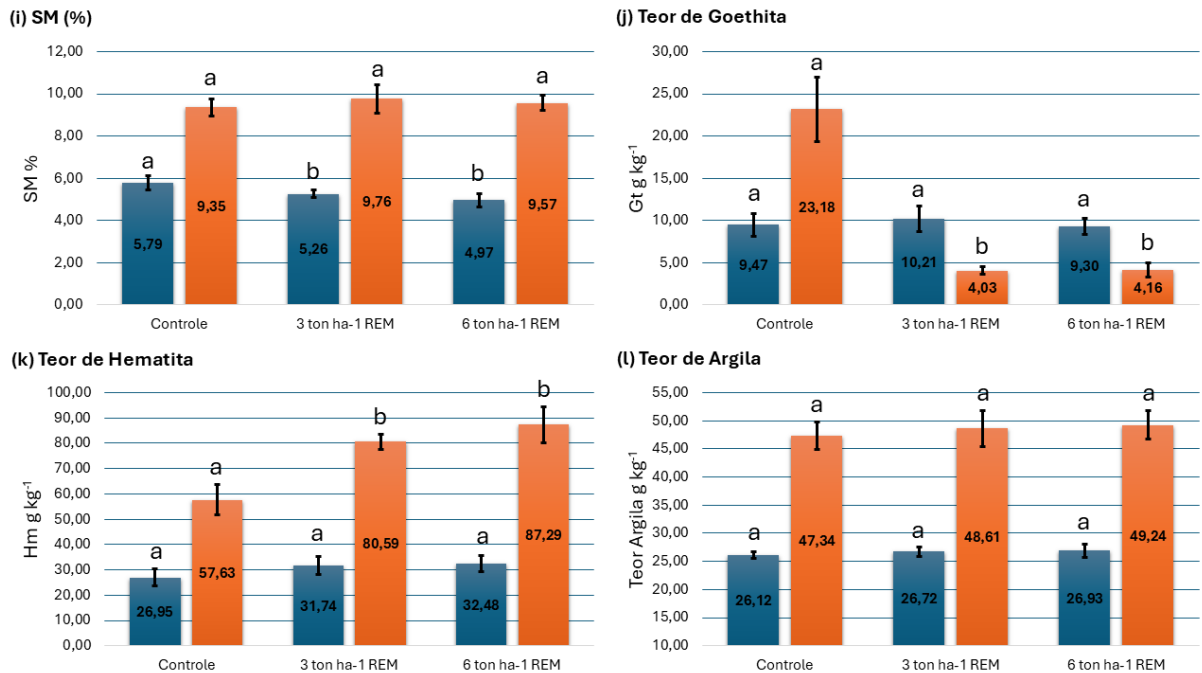


Figura 4. SM (%), teor de goethita (Gt), hematita (Hm) e argila em solos de Índice TA < 10 e Índice TA > 10 após aplicação de REM. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Barras de erro representam o desvio padrão ($n = 4$).

Figura 5 - Médias \pm desvio padrão dos atributos físico, mineralógicos e magnéticos do solo submetidos a doses de REM.

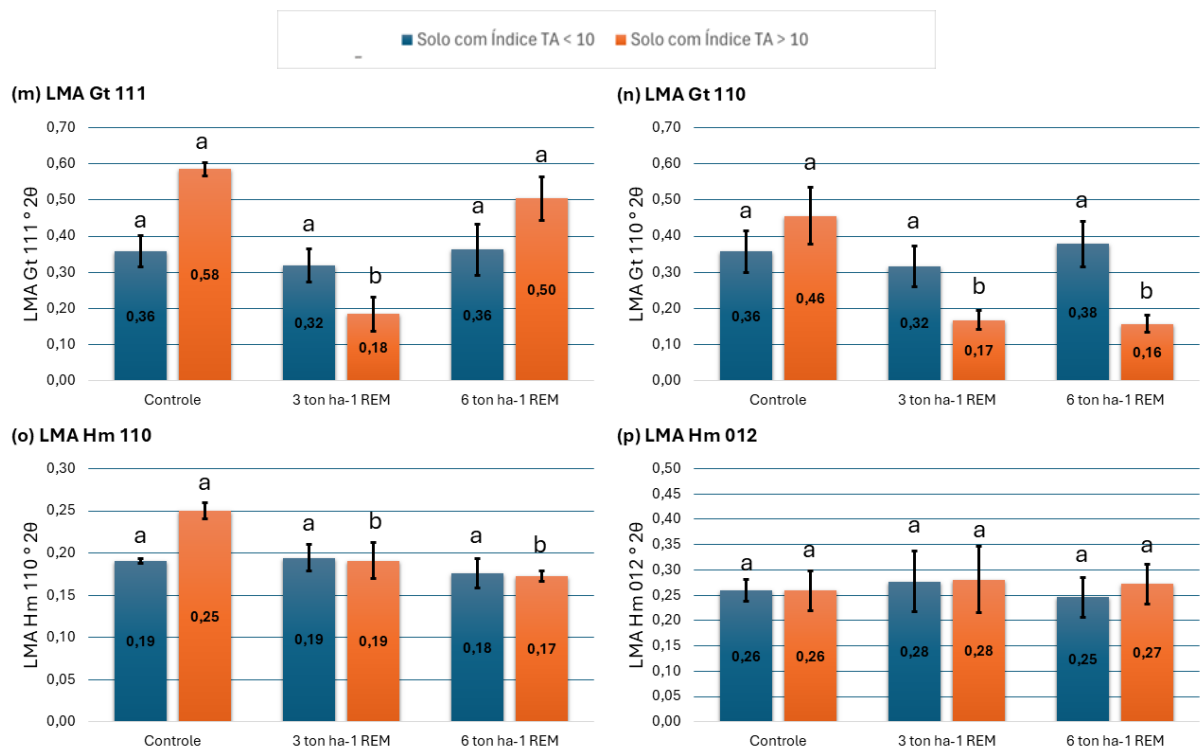


Figura 5. Largura à meia altura (LMA) dos picos cristalográficos da goethita (Gt 111, Gt 110) e da hematita (Hm 110, Hm 012) em solos de Índice TA < 10 e Índice TA > 10 após aplicação de REM. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Barras de erro representam o desvio padrão ($n = 4$).

Figura 6 - Médias \pm desvio padrão dos atributos físico, mineralógicos e magnéticos do solo submetidos a doses de REM.

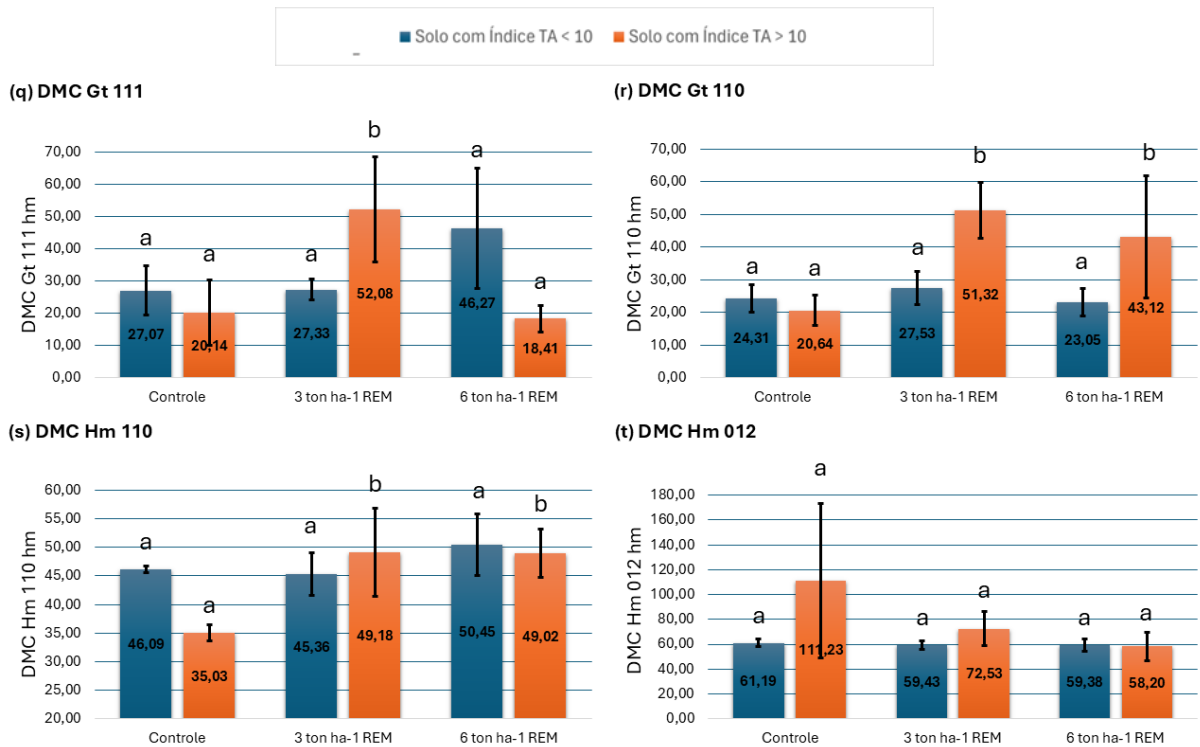
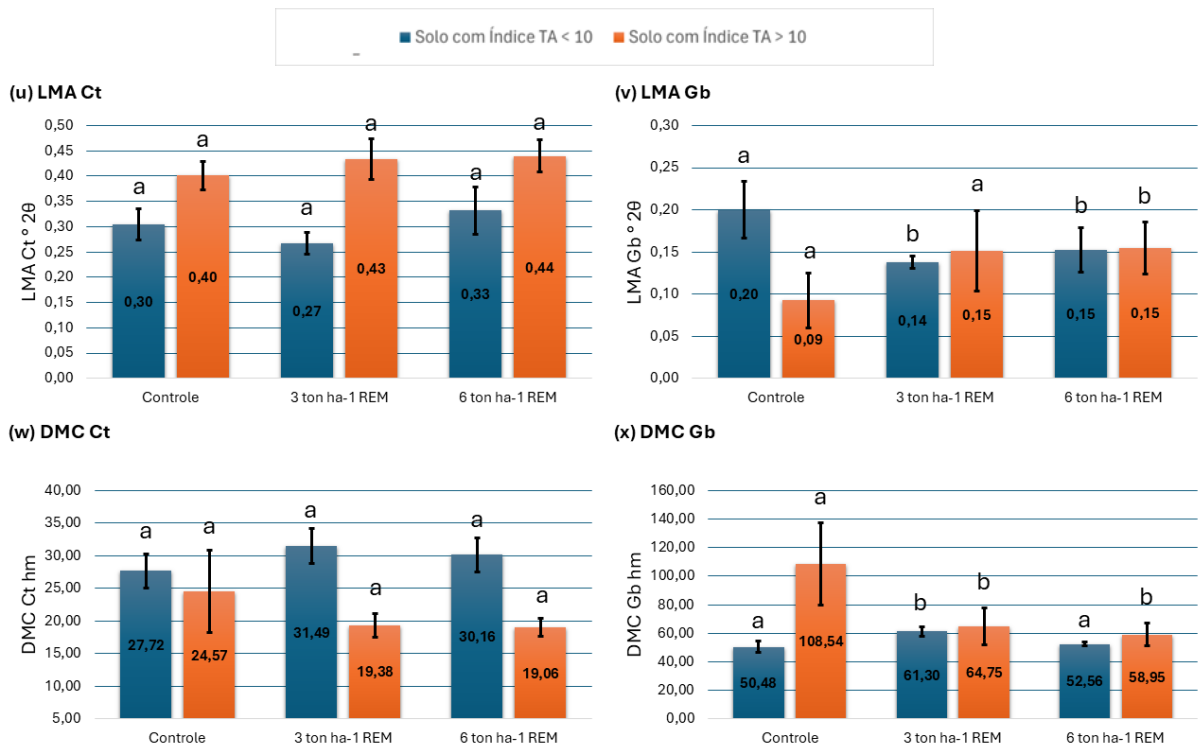


Figura 6. Diâmetro médio de cristalito (DMC) dos picos da goethita (Gt 111, Gt 110) e da hematita (Hm 110, Hm 012) em solos com Índice TA < 10 e Índice TA > 10, após aplicação de REM. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Barras de erro representam o desvio padrão ($n = 4$).

Figura 7 - Médias \pm desvio padrão dos atributos físico, mineralógicos e magnéticos do solo submetidos a doses de REM.



(y) Relação Caulinita/Gibbsita

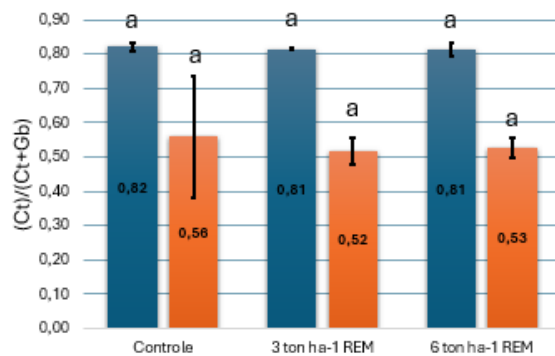


Figura 7. Largura à meia altura (LMA), diâmetro médio de cristalito (DMC) e relação mineralógica Ct/(Ct + Gb) em solos com Índice TA < 10 e Índice TA > 10 após aplicação de REM. Foram avaliados: LMA da caulinita (Ct) e gibbsita (Gb), DMC de Ct e Gb, e a razão entre os dois minerais. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Barras de erro representam o desvio padrão ($n = 4$).

4.2.2.1 Resultado do Teor de Argila do Solo

A aplicação do REM não resultou em alterações significativas no teor de argila dos solos estudados (Figura 4I). No solo de Índice TA > 10, houve uma leve redução nos valores, enquanto no solo de Índice TA < 10 observou-se um pequeno aumento, porém sem diferenças estatísticas. Esses resultados estão alinhados com dados de Ronquim (2010), que também não identificaram mudanças expressivas na fração argila do solo com o uso de REM.

4.2.2.2 Resultado de Ferro Cristalino e Ferro Amorfo

Nos teores de ferro ditionito (Fed) (Figura 3f), observou-se um aumento expressivo em ambos os solos, com maior impacto no solo de Índice TA > 10, especialmente na dose de 6 t ha⁻¹, onde os teores aumentaram em 20% em comparação com o controle. Esse resultado sugere que os REM contribuem para a liberação de ferro na forma de óxidos livres, promovendo reestruturação mineralógica no solo (Martins, et al., 2023). Além disso, esse acréscimo corrobora com o aumento observado de óxidos de ferros no solo.

Já para o ferro oxalato (Feo), os efeitos do REM foram mais variáveis (Figura 03e). No solo de Índice TA < 10, não houve diferença significativa do controle para a dose de 3 t ha⁻¹ enquanto houve na dose de 6 t ha⁻¹. No solo de Índice TA > 10, houve diferença significativa somente para a dose de 3 t ha⁻¹. Esses achados corroboram

com estudos que apontam que a disponibilidade de Feo pode ser influenciada pelas características intrínsecas do solo, incluindo sua CTC e mineralogia (Martins et al., 2023). Além disso, Ronquim (2010) ressalta que REM podem induzir a formação de minerais secundários com superfícies altamente reativas, promovendo agregação e retenção de cargas, o que afeta diretamente a mobilidade do ferro.

A relação Feo/Fed é um indicador do estágio de desenvolvimento do solo (Kampf et al., 2012). Quando esse valor é maior ou igual a 1, significa que há mais ferro amorfo, ou seja, menos cristalino, indicando que o solo ainda é jovem e pouco intemperizado. Já quando essa relação é menor que 1, há uma maior quantidade de ferro cristalino e estável, característico de solos mais desenvolvidos e intemperizados (Prado e Prado, 2022). Isso significa que quanto maior o teor de Feo, mais recente e instável é o solo, enquanto um maior teor de Fed indica um solo mais antigo, estável e equilibrado mineralogicamente.

A relação Feo/Fed foi menor que 1 em todos os tratamentos, indicando uma maior proporção de ferro cristalino em comparação ao ferro amorfo. Nos solos com Índice TA < 10, a relação variou de 0,141 a 0,153, sugerindo que, apesar da presença de ferro amorfo, há um predomínio de óxidos de ferro cristalinos. Já nos solos com Índice TA > 10, a relação foi ainda menor, variando de 0,133 a 0,134, o que indica maior intemperismo e estabilização dos minerais de ferro.

4.2.2.3 Resultado do Teor Hematita

A aplicação de REM pode acelerar o processo de formação de minerais secundários ao fornecer minerais primários que, por intemperismo, liberam ferro no solo. Souza et al. (2018) destacam que os REM aumentam o poder tampão do solo, influenciando processos de oxidação e redução que favorecem a formação de óxidos de ferro, como a Hm.

A aplicação de REM aumentou significativamente o teor de Hm somente no solo de Índice TA > 10 na dose de 6 t ha⁻¹ (Figura 4k). No solo de Índice TA < 10, apesar dos teores de Hm aumentarem até 25%, em relação ao controle, não houve diferença significativa, enquanto no solo de Índice TA > 10 os incrementos chegaram a 51%, em relação ao controle, indicando que o REM, mesmo possuindo maior

quantidade de minerais silicatados, pode influenciar a disponibilidade de ferro para a formação desse óxido, provavelmente provenientes da biotita.

Dados auxiliares das análises de DRX (Figura 8), mostram que além do aumento do teor de Hm no solo com dose de 6 t ha^{-1} , a LMA na dose de 6 t ha^{-1} também promoveu diferença significativa entre o tratamento e controle. A LMA uma medida da largura de um pico de difração na metade de sua intensidade máxima. Em análise mineralógica DRX, a LMA é utilizada como um indicador indireto da cristalinidade dos minerais, sendo que valores mais altos refletem menor ordenamento estrutural e menor tamanho de cristalitos, enquanto valores menores indicam maior cristalinidade (Scherrer, 1918; Brindley & Brown, 1980). Na dose de 6 t ha^{-1} de REM no solo de Índice TA > 10, ocasionou uma diminuição da LMA da Hm 110 (Figura 5o), que se refere ao plano cristalográfico da Hm, um dos principais picos diagnósticos da Hm. Esse dado mostra que além de estar aumentando os teores de Hm no solo, a Hm que está sendo formada é mais cristalina do que o controle.

Figura 8 - DRX com foco na faixa de 2θ entre 23° e 49° , evidenciando os picos dos óxidos de ferro em solo de Índice de TA > 10 tratado com REM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Padrões de difração de raios X (CuK α) obtidos para solos com Índice TA > 10 após aplicação de REM nas doses de 0 (controle – preto), 3 t ha⁻¹ (azul) e 6 t ha⁻¹ (verde). Os principais reflexos correspondem às fases cristalinas de goethita (Gt 110 e Gt 111), hematita (Hm 012 e Hm 110) e NaCl (padrão interno).

4.2.2.4 Resultado do Teor Goethita

A aplicação de REM impactou de maneira distinta os teores de Gt nos solos estudados (Figura 4j). No solo de Índice TA < 10, observou-se um leve aumento nos teores desse óxido, sem diferença significativa. Já no solo de Índice TA > 10, houve uma redução drástica nos teores de Gt, chegando a uma diminuição de até 78%.

Estudos como o de Campos et al. (2010) destacam que a drenagem interna do solo é um fator determinante na formação de Gt e Hm. Condições de baixa drenagem favorecem a formação de Gt devido à maior disponibilidade de ferro reduzido e a um ambiente menos oxidante. Segundo Furcas et al. (2024) a presença de sílica dissolvida pode inibir a precipitação e a estabilidade da Gt, promovendo a formação de minerais como a ferrihidrita ou a conversão da Gt em Hm, que é mais estável em ambientes com maior teor de sílica e condições menos úmidas. A concentração da sílica dissolvida pode ter sido ocasionada pelos minerais silicatados provenientes da rocha como a andesina e actinolita.

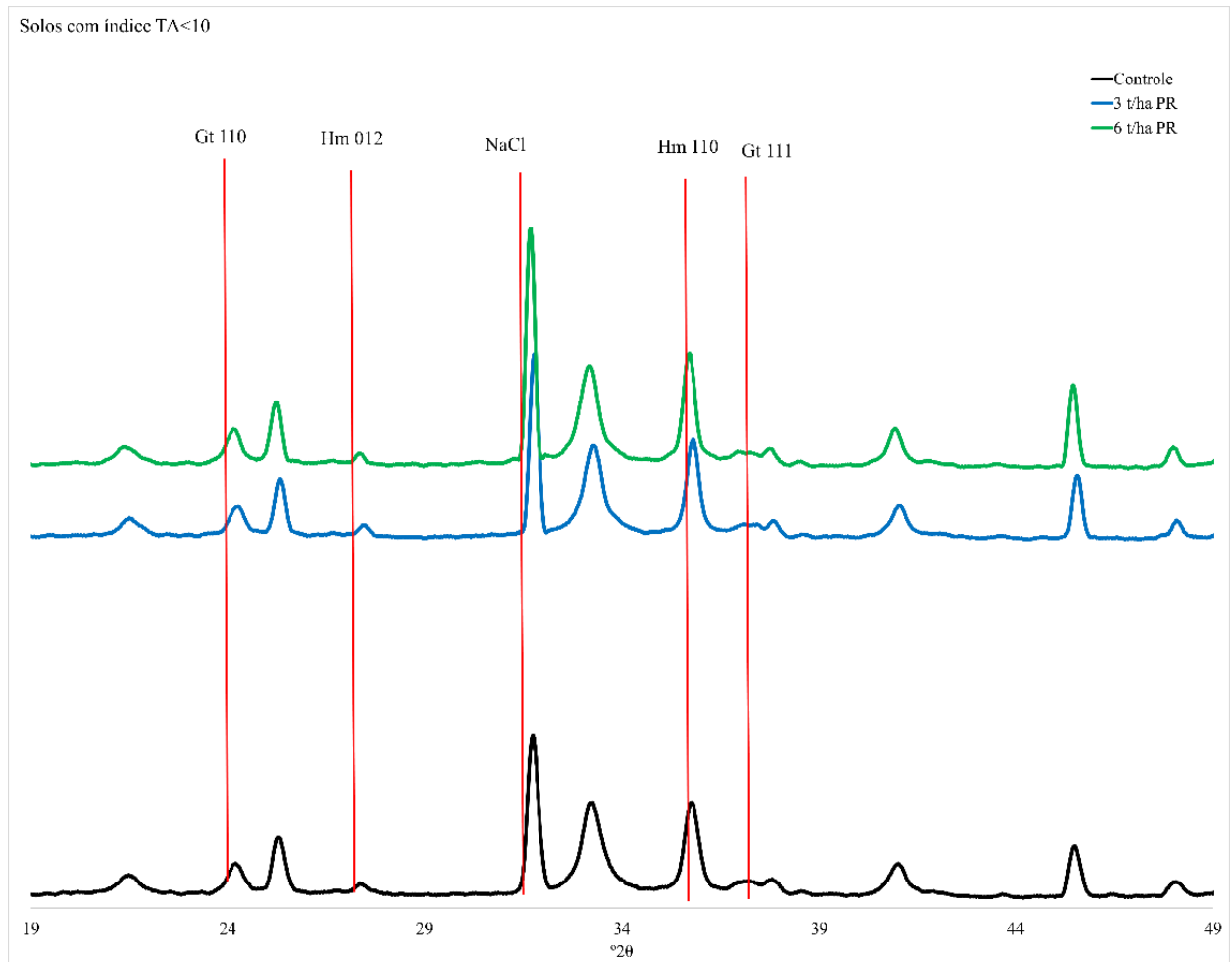
O DMC, estimado com base na razão entre picos de difração específicos, é amplamente utilizado para avaliar o grau de organização estrutural de minerais como a Gt. Valores mais elevados de DMC indicam maior cristalinidade, refletindo uma estrutura interna mais ordenada (Cornell & Schwertmann, 2003). No solo com Índice TA > 10, o tratamento com 3,0 e 6,0 t ha⁻¹ de REM promoveram um aumento significativo no DMC do pico Gt 110 (Figura 6r), acompanhado por uma redução significativa da LMA (Figura 5n), outro indicativo de aumento na cristalinidade. Paralelamente, observou-se redução no teor total de Gt, sugerindo que parte da fração menos ordenada foi transformada, possivelmente em Hm. A Gt remanescente, por sua vez, apresentou maior ordenamento estrutural, evidenciando um processo de recristalização ou maturação mineral induzido pelas alterações químicas promovidas pela aplicação do REM.

A redução do teor de Gt em solos altamente intemperizados pode representar um efeito benéfico, especialmente no que se refere à liberação de P adsorvido e à diminuição da fixação de nutrientes por esse óxido, que foi o caso observado no solo

de Índice TA > 10. Estudos demonstram que a Gt possui alta capacidade de adsorção de P, o que limita sua disponibilidade para as plantas (Fontes & Weed, 1996).

No solo com Índice TA < 10, os teores de Hm e Gt não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos (Figura 4j e 4k) o que também foi confirmado pelos parâmetros obtidos via DRX (Figura 9). Tanto o DMC quanto a LMA das reflexões cristalográficas da Hm e Gt não diferiram entre os tratamentos, indicando ausência de transformação mineral significativa. Resultados semelhantes foram observados por Resende et al. (2018), que relataram baixa sensibilidade de solos com menor atividade da fração argila à indução de transformações mineralógicas em curto prazo, mesmo sob aplicação de insumos remineralizantes.

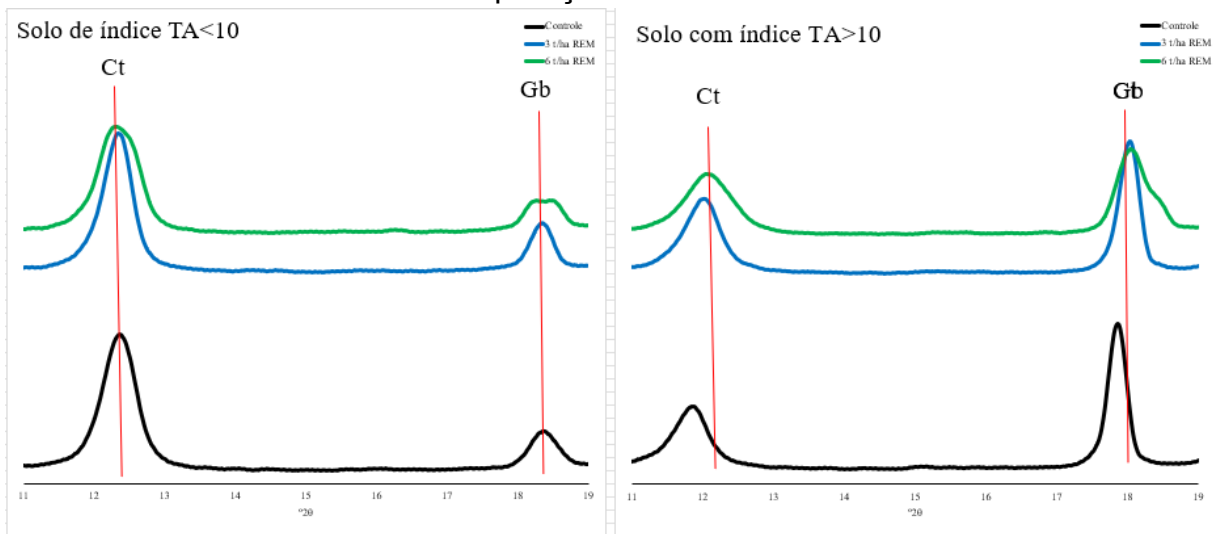
Figura 9 - DRX com foco na faixa de 2θ entre 23° e 49° , evidenciando os picos dos óxidos de ferro em solo de Índice de TA < 10 tratado com REM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Padrões de difração de raios X (CuK α) obtidos para solos com Índice TA < 10 após aplicação de REM nas doses de 0 (controle – preto), 3 t ha⁻¹ (azul) e 6 t ha⁻¹ (verde). Os principais reflexos correspondem às fases cristalinas de goethita (Gt 110 e Gt 111), hematita (Hm 012 e Hm 110) e NaCl (padrão interno).

Figura 10 – DRX de solos com Índice TA < 10 e Índice TA > 10 submetidos à aplicação de REM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Padrões de difração de raios X ($\text{CuK}\alpha$) obtidos para solos com Índice TA < 10 (esquerda) e Índice TA > 10 (direita) após aplicação de REM nas doses de 0 (controle – preto), 3 t ha^{-1} (azul) e 6 t ha^{-1} (verde). Os principais reflexos identificados correspondem às fases cristalinas de caulinita (Ct) e gibbsita (Gb).

4.2.2.5 Resultado dos Índices Cristalográficos da Ct e Gb

No solo de Índice TA < 10 e índice TA > 10, a Ct apresentou LMA e DMC relativamente estáveis entre os tratamentos (Figura 10), sem diferenças estatísticas, o que indica baixa reatividade mineral e maturidade pedogenética, conforme descrito por Kämpf e Curi (2000).

Para a Gb, os efeitos foram mais expressivos. No TA > 10, houve aumento significativo do LMA e redução significativa do DMC com o aumento das doses (Figura 7v e 7x). Esse comportamento indica a formação de cristais menores e menos ordenados, típicos de neoformações rápidas, frequentemente associadas ao intemperismo acelerado e à disponibilidade de Al^{3+} solúvel após aplicação de REM (Cornell & Schwertmann, 2003). Esse aumento da desordem cristalina eleva a área superficial e a densidade de cargas, favorecendo a adsorção de P e, conseqüentemente, sua imobilização no solo (Fontes et al., 2001).

Nos solos TA < 10, o DMC da Gb aumentou discretamente (Figura 7v), enquanto a LMA reduziu (Figura 7x), o que sugere um crescimento cristalino e maior ordenamento. Essa reorganização interna tende a reduzir a capacidade adsortiva de

P, o que pode favorecer sua disponibilidade para as plantas. Embora essas mudanças não tenham sido estatisticamente significativas, indicam uma tendência de estabilização mineralógica, típica de solos mais intemperizados e com baixa plasticidade mineral (Melo et al., 2012).

A razão $Ct/(Ct+Gb)$ permaneceu estável entre os tratamentos (Figura 7y) em ambos os solos, o que confirma que as alterações observadas decorreram de modificações na cristalinidade, e não na proporção entre os minerais. Em resumo, a remineralização promoveu neoformações de Gb mais desordenada no $TA > 10$, potencialmente desfavoráveis à disponibilidade de P, enquanto no $TA < 10$ os minerais tenderam à maior organização estrutural, o que pode representar um efeito edáfico positivo.

4.2.2.6 Resultado do Índice TA e Variações na SM%

Nos solos de Índice $TA < 10$, a SM Lf variou significativamente entre tratamentos tanto em dosagem de 3,0 ton ha⁻¹ quanto em 6,0 ton ha⁻¹ de REM (Figura 3h). O tratamento de 3,0 ton há⁻¹ REM promoveu incremento de 11,0% em relação ao controle. Nos solos de $TA > 10$, observou-se tendência de aumento, porém sem diferença significativa, representando incremento máximo de 9,1% no tratamento 3, 0 ton ha⁻¹ REM.

A SM Hf (Figura 3g) seguiu padrão similar à baixa frequência. Nos solos $TA < 10$, houve diferença significativa entre tratamentos de 3, 0 ton ha⁻¹ e 6, 0 ton ha⁻¹ REM. Nos solos $TA > 10$, observou-se tendência de incremento, porém também sem diferença significativa para ambos os tratamentos.

O parâmetro SM% mostrou comportamento contrastante entre os tipos de solo (Figura 4i). Nos solos $TA < 10$, houve redução significativa no tratamento de 6,0 ton ha⁻¹ REM. Nos solos $TA > 10$, os valores permaneceram estáveis para ambos os tratamentos.

A SM Lf reflete principalmente a concentração de minerais ferrimagnéticos como Mt e Mh, que são os principais responsáveis pelo sinal magnético em solos (Maher; Thompson, 1999). O incremento significativo observado no solo de Índice $TA < 10$ sugere pedogênese ou transformação de fases magnéticas em resposta ao REM,

processo que pode ocorrer através da redução de óxidos de ferro menos magnéticos ou pela precipitação de novas fases ferrimagnéticas (Schwertmann; Taylor, 1989).

O SM% é calculado pela fórmula: $SM\% = 100 \times (SM_{Lf} - SM_{Hf}) / SM_{Lf}$, sendo um indicador sensível da presença de partículas superparamagnéticas, tipicamente com diâmetro inferior a 20 nm (Dearing, 1999). Valores de SM% superiores a 2% indicam presença significativa de partículas ultrafinas de óxidos de ferro, frequentemente associadas a processos pedogenéticos ativos (Maher, 1998). A redução do SM% nos solos TA < 10 sugere que a remineralização promove a redução de partículas magnéticas, fazendo-as transitar do domínio superparamagnético para o domínio estável simples, processo que reduz a dependência da frequência (Dunlop; Özdemir, 1997).

Nos solos TA > 10, a estabilidade do SM% contrasta com as transformações cristalográficas mais pronunciadas observadas por DRX, onde o DMC da Gb reduziu de 100,3 para 56,0 nm na dosagem de 6,0 ton ha⁻¹. Esta aparente contradição pode ser explicada pela maior complexidade mineralógica destes solos, onde múltiplos processos ocorrem simultaneamente (Costa et al., 1999). A presença inicial de maior diversidade de óxidos de ferro pode mascarar mudanças específicas no tamanho de partículas superparamagnéticas.

A maior responsividade dos solos TA < 10 aos tratamentos, diferenças significativas em ambas as frequências e no SM%, sugere que, apesar da menor concentração inicial de minerais magnéticos, estes solos são mais sensíveis às transformações induzidas pela remineralização. Este comportamento pode estar relacionado à menor capacidade tampão destes solos, conforme descrito por Fontes e Weed (1996) para solos altamente intemperizados dominados por Ct e Gb.

As transformações mineralógicas observadas têm implicações diretas para a qualidade estrutural do solo. O aumento da SM Bf indica maior presença de óxidos de ferro pedogênicos finamente divididos, como Mh e Mt ou ferrihidrita parcialmente cristalizada (Dearing, 1999; Torrent et al., 2006). Embora esses minerais não sejam altamente cristalinos, sua presença favorece a agregação do solo ao atuar como núcleos de cimentação entre partículas de argila (Schwertmann; Taylor, 1989). Nos solos com Índice TA < 10, caracterizados por menor concentração natural de óxidos de Fe e presença dominante de Ct, esse processo de cimentação ganha relevância

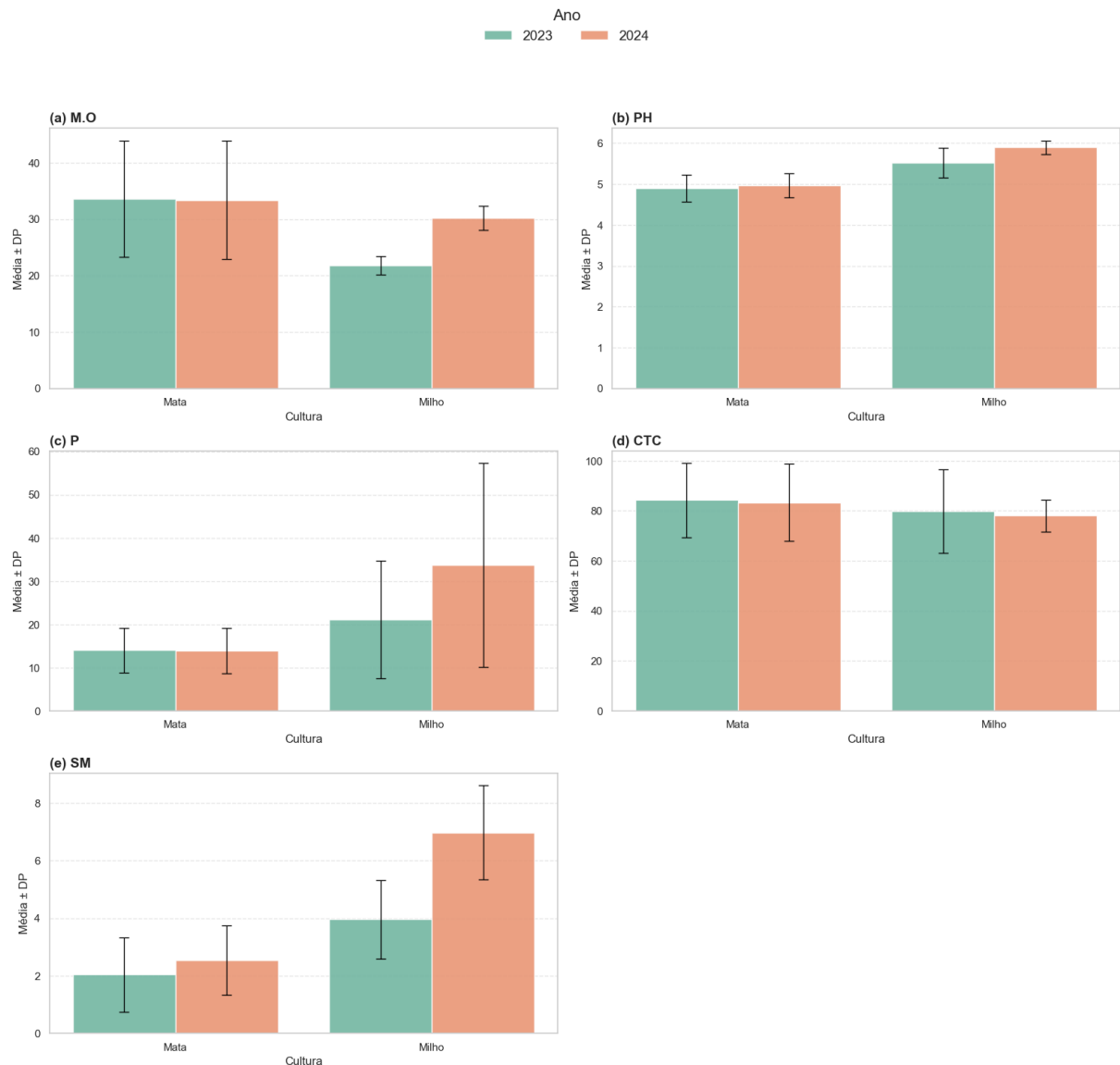
por compensar a baixa capacidade natural de agregação estrutural (Kämpf; Curi, 2000).

A redução da SM% no solo com Índice TA < 10 pode estar associada à menor proporção de óxidos de ferro finamente divididos, como Mh e ferrihidrita, altamente reativos à adsorção de ânions como o fosfato (Dearing, 1999). Paralelamente, o aumento do DMC da Gb indica formação de cristais maiores e mais ordenados, os quais apresentam menor área superficial específica e menor capacidade adsortiva (Torrent et al., 1994). Apesar disso, observou-se redução no P disponível, comportamento inverso ao esperado. Essa discrepância pode estar ligada à curta duração do experimento, não permitindo ainda a manifestação dos efeitos positivos da reorganização mineral, os quais, a longo prazo, podem favorecer a disponibilidade de P em solos altamente intemperizados (Fontes; Weed, 1996).

4.3 Experimento de Campo

Em condições de campo, sem controle de temperatura e precipitação, a aplicação de 12 t ha⁻¹ de REM total, apresentou efeitos distintos sobre os atributos do solo influenciando CTC, a disponibilidade de P, MO e Índice TA. (Figura 7).

Figura 11 - Variação de atributos químicos e Índice de TA do solo entre os anos de 2023 e 2024, em um solo de TA < 10.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Médias e desvios-padrão dos atributos: (a) matéria orgânica (M.O), (b) pH (CaCl_2), (c) fósforo disponível (P), (d) capacidade de troca catiônica (CTC) e (e) suscetibilidade magnética (SM), avaliados em duas condições de uso do solo: mata, área agrícola de milho. Comparação entre os anos agrícolas de 2023 (verde) e 2024 (laranja).

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises estatísticas referentes às propriedades químicas e Índice TA do solo em área agrícola cultivadas com milho e em mata nativa, nos anos agrícolas de 2023 e 2024. Foram aplicados testes de normalidade e, conforme a distribuição dos dados, utilizados testes t de Student ou Mann-Whitney para comparação entre os grupos. A tabela indica os valores de p, a significância estatística das diferenças observadas e as tendências de variação entre os usos do solo para cada ano avaliado.

Tabela 7 - Resultados da análise estatística das propriedades químicas e Índice TA do solo em área agrícola cultivadas com milho e em mata nativa nos anos de 2023 e 2024.

Variável	Ano	Normalidade (Milho/Mata)	Teste Utilizado	p-valor	Diferença Significativa?	Tendência Observada
MO	2023	Sim / Sim	t-test	0.0054	Sim ($p < 0,05$)	↓ MO no milho
MO	2024	Sim / Sim	t-test	0.3866	Não	Sem alteração
pH	2023	Sim / Sim	t-test	0.0143	Sim	↑ pH no milho
pH	2024	Sim / Sim	t-test	0.0000	Sim	↑ pH no milho
P	2023	Sim / Não	Mann-Whitney	0.1980	Não	Sem alteração
P	2024	Sim / Não	Mann-Whitney	0.0132	Sim	↑ P no milho
CTC	2023	Sim / Sim	t-test	0.6419	Não	Sem alteração
CTC	2024	Sim / Sim	t-test	0.3787	Não	Sem alteração
SM Lf	2023	Sim / Sim	t-test	0.0313	Sim	↑ SM no milho
SM Lf	2024	Sim / Sim	t-test	0.0061	Sim	↑ SM no milho

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: A tabela apresenta os resultados dos testes de normalidade (Shapiro-Wilk), testes de comparação entre grupos (t de Student ou Mann-Whitney, conforme a distribuição dos dados), significância estatística ($p < 0,05$) e direção das diferenças entre solos cultivados com milho e solos de mata nativa. Setas indicam tendência de aumento (↑) ou redução (↓) nas médias dos solos cultivados em relação à referência.

Na CTC (Figura 11d), a área agrícola cultivada com milho no ano de 2023 e 2024 apresentaram valor abaixo da área de mata (controle), possivelmente devido ao tempo necessário para que os minerais liberados pelo REM promovam um efeito duradouro na retenção de cátions. Outro fator é que a CTC, medida pelo método convencional de caracterização de solos, indica que o milho pode ter aproveitado os nutrientes liberados pelo REM. Esses resultados corroboram com estudos que indicam a eficiência dos REM na elevação da CTC depende da saturação por bases e da composição mineralógica do REM aplicado (Leonardos et al., 2000; Busato et al., 2022). Em casa de vegetação, no entanto, observou-se um aumento progressivo da CTC (Figura 2b), sugerindo que, em um menor espaço de tempo, a planta não demandou quantidades elevadas de bases para crescimento.

A disponibilidade de P apresentou um aumento expressivo na área agrícola tanto em 2023 quanto em 2024 quando comparadas com o controle (Figura 11c). Esse comportamento é consistente com os resultados da casa de vegetação, feito anteriormente a etapa de campo, onde também foi observado um incremento na disponibilidade de P (Figura 2c), reforçando a hipótese de que a eficiência dos REM pode variar conforme as condições ambientais e a mineralogia do solo (Souza et al., 2018). O aumento do teor de P no solo também foi observado em outros estudos tanto

em extrator de Mehlich I quanto resina (Luchese et al., 2021; Martins et al., 2015). Esse incremento pode ocorrer tanto pela presença de apatitas no REM, quanto por efeitos indiretos, como a elevação do pH e a introdução de óxidos de silício, que reduzem a adsorção do fosfato e aumentam sua disponibilização geoquímica para as plantas (Alleoni et al., 2019; Cornell e Schwertmann, 2003).

Em relação à MO, a área agrícola apresentou uma redução dos teores em ambos os anos avaliados (Figura 11a). Por se tratar de uma área destinada a milho silagem a extração de material vegetal é alta devido a remoção completa da planta de milho o que resulta em menores aportes de resíduos vegetais ao solo (Pizzani, 2016).

Os resultados de pH mostram um aumento progressivo partindo de 4,9 na área de mata, subindo para 5,7 na área agrícola em 2023 e alcançando 6,0 em 2024. Esse aumento ocorreu mesmo sem aplicação de calcário no período de avaliação.

A elevação do pH do solo (Figura 11b) é uma resposta já relatada em diversos estudos com aplicação de REM (Martins et al., 2023; Melo et al., 2012; Souza et al., 2018), sendo atribuída a mecanismos distintos daqueles promovidos pela calagem. Enquanto o calcário neutraliza a acidez do solo por meio da dissolução de carbonatos de cálcio e magnésio, os REM atuam principalmente de forma indireta, promovendo a remoção de íons H^+ da solução do solo à medida que os minerais silicatados sofrem intemperismo (Toscani; Campos, 2017; Silva et al., 2012; Ribeiro et al., 2010). Além disso, o pH de abrasão dos REM, que representa a reação natural do REM com a água, também contribui para a elevação do pH do solo, especialmente em materiais com valores mais alcalinos (Martins et al., 2023).

O Índice TA (Figura 11e) também foi influenciado pelo REM com um aumento na área agrícola nos dois anos observados. O aumento do Índice TA no solo de $TA < 10$, em contraste com a ausência desse efeito na casa de vegetação, pode ser explicado pela interação entre a MO e as flutuações redox naturais. Na área agrícola, pela maior variação de umidade e atividade microbiana, ocorrem ciclos de redução e oxidação do ferro, levando à dissolução de Fe^{3+} e à mobilização de Fe^{2+} sob condições anaeróbicas. Durante a reoxidação em períodos de seca, esse ferro dissolvido pode precipitar na forma de minerais magnéticos, como maghemita e magnetita, aumentando o Índice TA (Dematte; Epiphanyo; Formaggio, 2000).

4.3.1 Proposta de Valoração Econômica das Melhorias nos Atributos do Solo

O objetivo desta seção é quantificar economicamente o valor agregado ao patrimônio agrícola por meio da regeneração dos atributos do solo avaliados, resultante da aplicação de REM. A abordagem proposta não se baseia a avaliar ganhos de produtividade, mas busca mensurar a valorização do capital natural do solo, convertendo melhorias do solo em um valor monetário tangível e defensável.

4.3.2 Fundamentação e Metodologia de Valoração

A metodologia para a valoração econômica se baseia no VTN, um parâmetro oficial e consolidado, que representa o valor de mercado do imóvel rural desprovido de benfeitorias, culturas e pastagens. O VTN é um excelente proxy para o capital natural, pois seu valor é intrinsecamente ligado à capacidade produtiva e à qualidade do solo (Pereira et al., 2015).

De acordo com a Receita Federal do Brasil (2024), no município de Muzambinho (MG), o VTN varia entre R\$ 26.700,00 e R\$ 42.000,00 com uma média de R\$ 34.350,00 para terras de aptidão boa ou regular. Considerando que a densidade média da área de estudo é de 1,3 g cm⁻³ e que o manejo agrícola explora a camada 0-60 cm, o valor médio do VTN pode ser relacionado à 7,8 toneladas de solo, resultando em um custo de R\$ 4,40 por kg de solo.

A regeneração do solo foi avaliada com base nos atributos apresentados na Tabela 8 e na Figura 12. A tabela mostra a quantidade de área em que os atributos do solo apresentaram aumento, enquanto a figura ilustra a distribuição espacial dessas melhorias ao longo da área avaliada. A área regenerada foi obtida por meio de mapas de interpolação gerados pelo método do inverso do quadrado da distância (IDW). A área considerada como regenerada corresponde à diferença entre os anos de 2023 e 2024 nas regiões em que houve aumento dos atributos analisados. Os cálculos indicam uma recuperação média de 2,0 hectares na camada de 0–20 cm, o que equivale a aproximadamente 5,2 toneladas de solo com melhoria de qualidade.

Aplicando o valor médio de R\$ 4,40/kg de solo, esse serviço ecossistêmico pode ser estimado em R\$ 22.880,00, ou R\$ 11.440,00 por hectare.

Esse cálculo fornece uma métrica objetiva para avaliar o impacto econômico da regeneração edáfica e sua viabilidade dentro de programas de PSA.

A metodologia de classificação de solos pelo Índice TA mostrou-se eficiente ao detectar alterações na pedogênese do solo após aplicação de REM de solo em um

curto período, podendo se consolidar como uma ferramenta estratégica para implementação da PNPSA, instituída pela Lei nº 14.119/2021.

Estudos publicados no Boletim Técnico da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS, 2017) reforçam a importância da recuperação edáfica para a sustentabilidade da agricultura, enquanto a Revista Novo Solo (ABREFEN, 2025), publicada pela Associação Brasileira dos Produtores de Remineralizadores de Solo e Fertilizantes Naturais (Abrefen), evidencia o papel dos REM na regeneração dos solos e na formulação de políticas públicas voltadas à agricultura sustentável.

Os REM têm se mostrado uma estratégia eficaz para regeneração do solo e melhoria da produtividade agrícola. Siqueira (2024) destaca a necessidade de ferramentas quantitativas para medir o impacto dessa prática, enquanto Sant'ana et al. (2024) demonstraram que a utilização do Índice TA pode ser usada para definir zonas de manejo, influenciando diretamente o teto produtivo das culturas, com variações de até 10 sacas por hectare em função da mineralogia do solo.

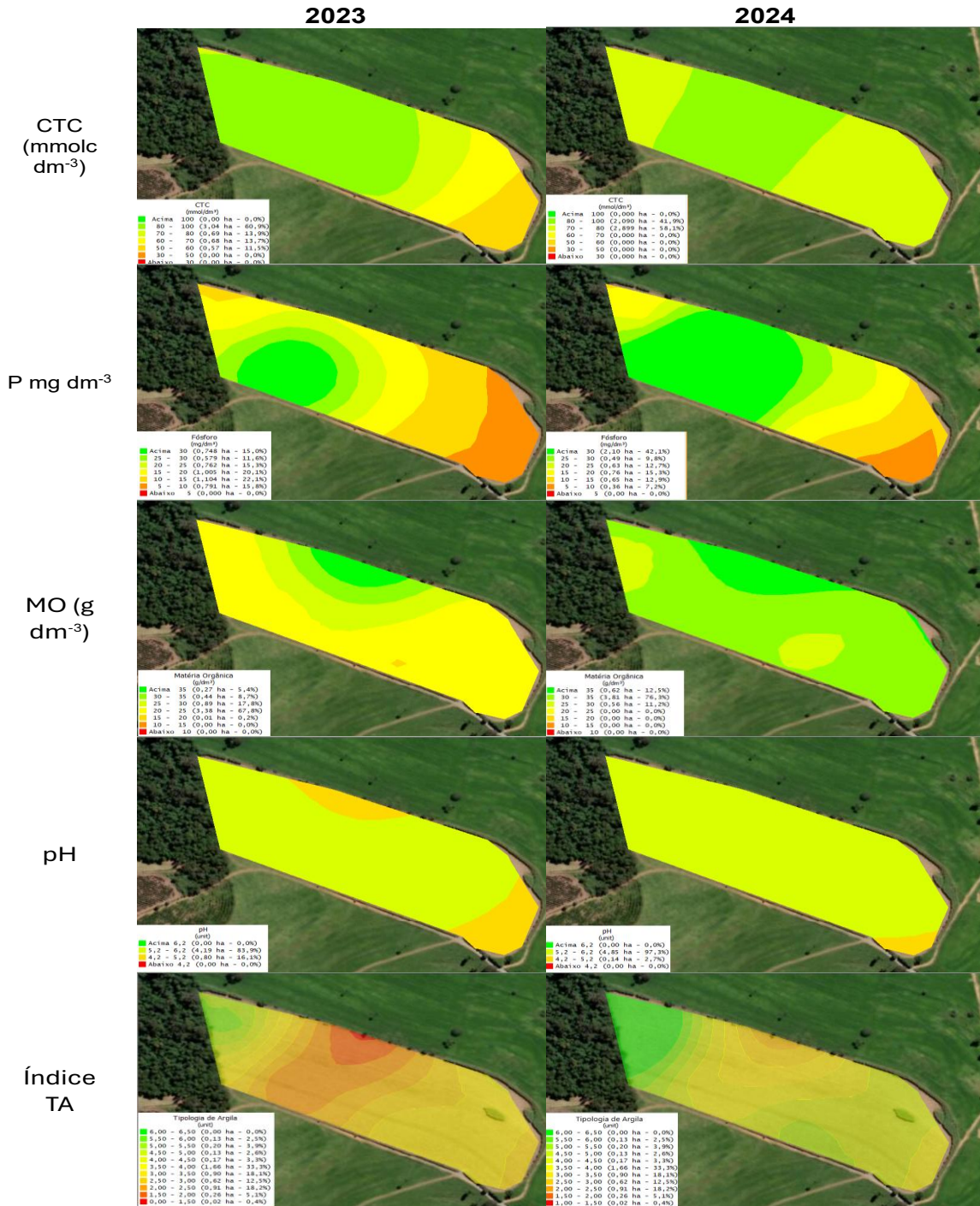
Tabela 8 – Área (ha) com melhoria dos atributos do solo em 2023 e 2024 após aplicação de REM

Atributos do Solo	Área (ha)		
	Ano 2023	Ano 2024	Área Regenerada na Safra
MO > 30 (g dm ⁻³)	1,6	5	3,4
CTC > 60 (mmolc dm ⁻³)	4,4	5	0,6
P > 15 (mg dm ⁻³)	4,11	4,63	0,5
TA > 4 (%)	0,65	4,15	3,5

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: Área de solo regenerada (ha) entre 2023 e 2024 com base em atributos edáficos mínimos considerados indicadores de melhoria: MO > 30 g dm⁻³, CTC > 60 mmolc dm⁻³, P > 15 mg dm⁻³ e TA > 4.

Figura 12 – Mapas interpolados de atributos químicos e Índice TA do solo nos anos de 2023 e 2024



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Distribuição espacial interpolada dos atributos capacidade de troca catiônica (CTC), fósforo disponível (P), matéria orgânica (MO), pH (CaCl₂) e Índice TA, nos anos agrícolas de 2023 (esquerda) e 2024 (direita), em área de cultivo. Os mapas foram elaborados com base em dados georreferenciados, utilizando interpolação por inverso da distância ao quadrado (IDW).

5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a aplicação de REM induz transformações mineralógicas detectáveis pela SM, com respostas moduladas pelo Índice TA. Solos de índice TA < 10 apresentaram incrementos de 11% na SM (%) demonstrando a formação de minerais pedogenéticos com maior assinatura magnética, enquanto isso, solos de Índice TA > 10 exibiram neoformação de Hm (51% de aumento) com maior cristalinidade e redução drástica da Gt (78%). No campo, a área regenerada acima de Índice TA > 4 expandiu de 0,65 ha para 3,5 ha em uma safra, gerando valor econômico estimado em R\$ 11.400,00 por hectare baseado nas melhorias edáficas.

A validação do Índice TA como ferramenta diagnóstica mineralógica e a primeira aplicação acadêmica do termo, estabelecem nova abordagem para otimização da remineralização baseada na mineralogia do solo. O sequestro de carbono de 0,18 t CO₂eq.t⁻¹ REM aplicado confirma benefícios climáticos adicionais. Os resultados confirmam que os REM constituem estratégia viável para regeneração edáfica em solos tropicais, oferecendo base científica para políticas de PSA e sistemas agrícolas sustentáveis. Estudos futuros devem investigar a persistência dessas transformações em períodos mais longos e sua aplicabilidade em diferentes condições edafoclimáticas.

REFERÊNCIAS

- ABREFEN – Associação Brasileira dos Produtores de Remineralizadores de Solo e Fertilizantes Naturais. **Revista Novo Solo**, 7. ed., 10 abr. 2025. Disponível em: revistanovosolo.org.br. Acesso em: 7 jul. 2025.
- Alleoni, L. R. F.; Camargo, L. A.; Mello, J. W. V. de. Silicatos e o seu papel na agricultura. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, n. 1, p. 23-31, 2019.
- Baldo, G. de C.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos e magnéticos de um Latossolo e suas relações com a produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 1-13, 2014.
- Bartkowski, B. et al. Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy. **PeerJ**, v. 8, p. e8749, 2020.
- Basei, A. et al. Tipologia de argila via susceptibilidade magnética para delimitação de zonas de manejo em solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 47, p. e0220112, 2023.
- Basei, M. A. S. et al. O Neoproterozóico-Cambriano no Sul do Brasil: geocronologia e evolução tectônica. **Boletim do Instituto de Geociências da USP**, Série Científica, v. 26, p. 35-57, 1995.
- Bigham, J. M. et al. Mineralogy of soils developed on a basaltic topo sequence in a subtropical environment. *In*: Dixon, J. B.; Moody, H. (Ed.). **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: SSSA Book Series, 2002. p. 329-351.
- Bouyoucos, G. J. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. **Soil Science**, v. 23, n. 4, p. 343-353, 1927.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2016.
- Bragg, W. H.; Bragg, W. L. The Reflection of X-rays by Crystals. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, v. 88, n. 605, p. 428-438, 1913.
- Brasil. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 14 jan. 2021.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece os critérios para o uso de remineralizadores e pó de rocha na agricultura junto ao MAPA. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 48, p. 3–4, 11 mar. 2016.
- Brindley, G. W.; Brown, G. **Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification**. London: Mineralogical Society, 1980.
- Burbano, H. **El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la agricultura sostenible**. Pasto, Colombia: Editorial Universidad de Nariño, 2022.
- Busato, J. G. et al. Resposta da susceptibilidade magnética à aplicação de ácidos húmicos em solos tratados com remineralizadores. **Geochimica Brasiliensis**, v. 36, n. 2, p. 215-224, 2022.
- Camargo, F. A. de O. et al. Interação entre remineralizadores e a fração argila de solos tropicais: implicações para a reatividade e retenção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 46, p. e0210087, 2022.

- Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).
- Campos, M. C. C.; Gama, M. A. P.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S. Relações solo-paisagem em uma topossequência com solos derivados de rochas pelíticas no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 493-504, 2010.
- Cardoso, I. M. et al. Produtividade de culturas e alterações em solos tropicais com uso de rochagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 53, n. 9, p. 1045-1053, 2018.
- Catalan, A. A.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial dos atributos do solo e sua relação com a produtividade do citros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 9, p. 830-836, 2016.
- Conceição, D. M. et al. Avaliação de remineralizadores na qualidade química e biológica de Latossolo. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. e37411427506, 2022.
- Constantino, M. A. et al. Valoração atribuída aos serviços ambientais de acordo com os diferentes métodos: uma revisão de literatura no período de 2005 a 2015. **Desenvolvimento em Questão**, v. 16, n. 44, p. 293-316, 2018.
- Cornell, R. M.; Schwertmann, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- Costa, A. C. S. et al. Análise de componentes principais de propriedades magnéticas e sua relação com óxidos de ferro em Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 485-494, 1999.
- Costanza, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, p. 152-158, 2014.
- Curi, N.; Kämpf, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). *In*: Ker, J. C.; Schaefer, C. E. G. R.; Vidal-Torrado, P. (org.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 207–302.
- Daniell, K. A.; Van Tonder, G. J. Barriers to the adoption of soil remineralization practices: a global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125601, 2021.
- De Mello Monte, M. B. et al. Políticas públicas para o fomento da rochagem no Brasil: desafios e oportunidades. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, DF, v. 12, n. 1, p. 143-158, 2021.
- Dearing, J. A. **Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system**. Kenilworth: Chi Publishing, 1994.
- Dearing, J. A. Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system. **GeoJournal**, Dordrecht, v. 47, n. 1/2, p. 165-177, 1999.
- Dominati, E.; Patterson, M.; Mackay, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858-1868, 2010.
- Dong, Y. et al. Rock powder amendment enhances soil microbial biomass and activity and nutrient availability in agricultural soils: a meta-analysis. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1198-1207, 2020.
- Doran, J. W.; Parkin, T. B. Defining and assessing soil quality. *In*: Doran, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3–21.

- Dourado, F. J. S. **Efeito residual de remineralizador como fonte de potássio na cultura da soja**. 2022. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, Jataí, 2022.
- Dulong, F. T. et al. Magnetic susceptibility in agriculture: perception and reality of a promising tool. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 5, 2015.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo). **São Paulo: 60 anos de ciência e tecnologia**. São Paulo: FAPESP, 2020.
- Fink, J. R.; Inda, A. V.; Bayer, C.; Torrent, J.; Barrón, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 57, n. 4, p. 402–410, 2019.
- Fontana, A.; Da Silva, P. M.; Fialho, G. P. Soil quality indicators in native forest and pasture areas in southern Brazil. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 49, n. 1, p. 45-54, 2018.
- Fontes, M. P. F.; Weed, S. B. Phosphate adsorption by clays and aluminum hydroxide particles dispersed in soil clay and clay-free systems. **Clays and Clay Minerals**, v. 44, n. 4, p. 609–616, 1996.
- Furcas, F.; Prah, U.; Schaller, J.; Kandeler, E. Silicon modifies the effect of drying-rewetting cycles on phosphorus availability and microbial activity in a temperate grassland soil. **Geoderma**, v. 441, p. 116744, 2024.
- Galharte, C. A.; Crestana, S. Avaliação do impacto ambiental da integração lavoura-pecuária: aspecto conservação ambiental no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1202-1209, 2010.
- Gedroiz, K. K. The colloidal chemistry of soils. **Zhurnal Opytnoi Agronomii**, v. 9, p. 272-293, 1908.
- Gordon, N. E. The application of colloid chemistry to soils. **Science**, v. 55, n. 1432, p. 627-628, 1922.
- Gravena, D. S. et al. **Processo De Caracterização E Classificação Da Composição Mineralógica Da Fração Argila De Solos Por Meio De Assinatura Magnética**. INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Patente de Invenção, BR 10 2020 023042 B1. Depósito: 12 nov. 2020. Concessão: 21 mar. 2023.
- Jackson, M. L. **Soil chemical analysis: advanced course**. 2. ed. Madison: Published by the author, 1985. 895 p.
- Jardim, M. H.; Bursztyn, M. A. Pagamento por serviços ambientais na gestão de recursos hídricos: o caso de Extrema (MG). **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 20, p. 353-360, 2015.
- Jenny, H. **Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology**. New York: McGraw-Hill, 1941.
- Kämpf, N.; Curi, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. H.; Schaefer, C. E. G. R. (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 107–138.
- Lal, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

- Leonardos, O. H. et al. A rochagem como alternativa para a recuperação e manutenção da fertilidade dos solos brasileiros. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 13-22, 2000.
- Loeppert, R. H. Iron Oxides. *In*: Ulrich, B.; Sumner, M. E. (Ed.). **Handbook of Soil Science**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 15-1–15-28.
- Loeppert, R. H.; Inskip, W. P. Iron. *In*: Sparks, D. L. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods**. Madison: SSSA Book Series, 1996. p. 639-664.
- Luchese, A. M. et al. Disponibilidade e absorção de nutrientes liberados por remineralizador em duas classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 45, p. e0200115, 2021.
- Mankins, J. C. **Technology Readiness Levels**. White Paper, NASA, Office of Space Access and Technology, 1995.
- Manning, D. A. C. et al. Mineral sources of potassium for agriculture. *In*: **Potassium in agriculture**. Berlin: Springer, 2015. p. 47-73.
- Manning, D. A. C.; Renforth, P. Enhanced weathering of silicate minerals. **Elements**, v. 20, n. 1, p. 27-32, 2024.
- Marques Júnior, J. et al. Mapeamento da tipologia de argila por meio da susceptibilidade magnética para delimitação de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 49, n. 7, p. 541-549, 2014.
- Martins, E. de S.; Martins, E. de S.; Hardoim, P. R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, p. 26-39, 2023.
- Martins, G. de C. et al. Correlação entre susceptibilidade magnética e indicadores de fertilidade do solo após aplicação de pó de rocha em lavoura de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 8, p. 531-537, 2021.
- Martins, G. de C.; Siqueira, D. S. da; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T. Mineralogia da fração argila e sua relação com a suscetibilidade magnética em Neossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 671-681, 2015.
- Matias, L. F. M. S. et al. Assinatura magnética na avaliação da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 3, p. 660-670, 2015.
- Matias, L. F. M. S.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S.; Souza, Z. M. Suscetibilidade magnética como indicador da mineralogia da fração argila em solos tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 523-531, 2010.
- McKeague, J. A.; Day, J. H. Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 46, n. 1, p. 13-22, 1966.
- Mehra, O. P.; Jackson, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system with sodium bicarbonate buffer. **Clays and Clay Minerals**, Oxford, v. 7, n. 1, p. 317-327, 1960.
- Melo, V. de F. et al. Mineralogia e gênese de Latossolos e Cambissolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 287-301, 2001.
- Melo, V. F. et al. Alterações químicas e mineralógicas em Latossolo e Neossolo Quartzarênico após a adição de pó de basalto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 153–162, 2012.
- Moore, D. M.; Reynolds, R. C. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1997.

- Moreira, A. et al. Silicate rock with different granulometry as a potassium source for alfalfa and centrosema crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e02806, 2023.
- Nayak, A. K. et al. Assessment of ecosystem services of rice farms in eastern India. **Ecological Processes**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1–14, 2019.
- Nelson, D. W.; Sommers, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: Sparks, D. L. (ed.). **Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods**. Madison: SSSA Book Series, 1996. p. 961-1010.
- Oliveira, A. M. S. de. **A relação capital-trabalho na agroindústria sucroalcooleira paulista e a intensificação do corte mecanizado: gestão do trabalho e certificação ambiental**. 2003.
- Oliveira, F. T. de. **Impacto da remineralização na produtividade agrícola e emissões de gases de efeito estufa: uma meta-análise para culturas tropicais**. 2023. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.
- Oliveira, L. F. C. de et al. Tipologia de argila e sua relação com atributos físicos e químicos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 1, p. 1-11, 2015.
- Peluco, R. G. et al. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, p. 259–266, mar. 2015. DOI:10.1590/S0100-204X2015000300010.
- Pereira, H. N. et al. Fatores determinantes do valor da terra nua no estado de Goiás. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 1, p. 119-136, 2015.
- Pizzani, K. C. P. et al. Produtividade e composição bromatológica de milho para silagem em sucessão a adubos verdes. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 1, p. 124-133, 2016.
- Prado, H. do; Prado, C. H. B. A. **Manual de classificação de solos brasileiros**. 5. ed. Piracicaba: FEALQ, 2022.
- Ramos, E. M. et al. Sensibilidade da susceptibilidade magnética a alterações edáficas incipientes induzidas por manejo agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 5, p. 565-573, 2020.
- Receita Federal do Brasil. **Sistema de Preços de Terras (SIPT)**. Valores de Terra Nua para o município de Muzambinho (MG). Brasília, DF: Receita Federal, 2024.
- Resende, A. V. de; Kinjo, T.; Chaves, L. J. G. Efeito do manejo e da textura na recuperação de matéria orgânica e fósforo em solos sob pastagem no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 4, p. 488-497, 2018.
- Resende, S. C. et al. Mineralogia da fração argila de Latossolos sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 4, p. 1109-1119, 2014.
- Ribeiro, M. R. et al. Alterações na química do solo com o uso de remineralizadores. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1613–1623, 2010.
- Ronquim, C. C. **Conceitos de pedologia**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. 57 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 14).
- Rowe, H. D. et al. Rock powder additions enhance organic carbon stability in soil. **Nature Geoscience**, v. 17, p. 567–574, 2024.
- Sandhu, H. S. et al. The Future of Farming: The Value of Ecosystem Services in Conventional and Organic Arable Land. An Experimental Approach. **Ecological Economics**, v. 64, n. 4, p. 835-848, 2008.

- Sant'Ana, E. G.; Siqueira, J. O. Suscetibilidade magnética basal de Latossolos de diferentes litologias. *In: reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água*, 21.; simpósio mineiro de ciência do solo, 8., 2024, Viçosa, MG. **Anais eletrônicos...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2024.
- Santos, J. C. B. et al. Nanopartículas em solos tropicais: ocorrência, transformações e implicações para a fertilidade. **Química Nova**, v. 44, n. 7, p. 844-855, 2021.
- SBCS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo). **Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: SBCS, 2017.
- Schaefer, C. E. G. R. et al. Brazilian Latosols: a review. **Catena**, v. 72, n. 3, p. 307-329, 2008.
- Scherrer, P. Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen**, Mathematisch-Physikalische Klasse, v. 1918, p. 98-100, 1918.
- Schwertmann, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurer Ammoniumoxalat-Lösung. **Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde**, v. 105, n. 3, p. 194-202, 1964.
- Schwertmann, U.; Taylor, R. M. Iron oxides. *In: Dixon, J. B.; Weed, S. B. (Ed.). Minerals in soil environments*. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.
- Shirzaditabar, F.; Heck, R. J. A review of the application of electromagnetic induction (EMI) for soil characterization. **Geoderma**, v. 404, p. 115211, 2021.
- Silva, A. C. da et al. Gênese e distribuição de óxidos de ferro em uma topossequência de solos derivados de arenito e basalto no oeste paulista. **Boletim de Geografia**, v. 38, p. 117-132, 2020.
- Silva, A. C. da. et al. Rock powders as sources of nutrients for crops. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 4, p. 1473-1483, 2017.
- Silva, A. P. da; Tormena, C. A.; Imhoff, S. Funções de pedotransferência para a curva de retenção de água de solos do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 1-13, 2015.
- Silva, F. de A. M. da et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo para definição de zonas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1137-1143, 2014.
- Silva, J. R. da. **Eficiência agrônômica de remineralizadores de solo em função da granulometria e da mineralogia de solos com diferentes texturas**. 2023. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.
- Silva, J. de S.; Gomes, J. B. V.; Souza, Z. M. Poder tampão de pH de Latossolos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 339-346, 2022.
- Silva Júnior, J. J. da; Granemann, D. C. Variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo em uma área irrigada por pivô central. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 706-715, 2010.
- Silva, L. F. C. et al. Aplicação de pó de rocha e os efeitos sobre atributos químicos do solo. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 1, p. 36-42, 2012.
- Silva, L. M. A. L. et al. Pagamento por Serviços Ambientais e práticas conservacionistas do solo: estudo de caso em uma propriedade rural inserida na sub-bacia Hidrográfica do Rio Turvo-MG. **Ciência Florestal**, v. 35, p. e85863, 2025.

- Silveira, M. L. A. et al. Rock dust as a source of phosphorus and other nutrients for crop production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 113, n. 2, p. 1297-1308, 2021.
- Siqueira, D. S. et al. Zonas de manejo definidas pela tipologia de argila como estratégia para otimização da produtividade agrícola. **Geoderma**, v. 445, p. 116890, 2024.
- Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010.
- Soil survey staff. **Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual**. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. Lincoln: USDA-NRCS, 2014.
- Souza, A. M. et al. Remineralizadores de solo: uma alternativa para a correção da acidez do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 5, p. 374-379, 2018.
- Souza, K. W. et al. Efeito de remineralizadores de rochas no pH e na fertilidade do solo. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 2, p. 1–6, 2018.
- Souza, M. E. P. de et al. Rock powder can improve vermicompost chemical properties and plant nutrition: na on-farm experiment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 1–12, 2018.
- Swoboda, R. Magnetic susceptibility as an indicator of pedogenetic processes in tropical soils under different management systems. **Catena**, v. 137, p. 177-185, 2016.
- Teixeira, P. C. et al. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- Thompson, M. Variation of precision with concentration in an analytical system. **Analyst**, v. 113, n. 10, p. 1579-1587, 1988.
- Tiessen, H.; Cuevas, E.; Chacon, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. **Nature**, v. 371, n. 6500, p. 783-785, 1994.
- Torrent, J. et al. The magnetic susceptibility of soils: A review. **Geoderma**, v. 159, n. 3-4, p. 189-198, 2007.
- Toscani, C. A.; Campos, D. T. Mecanismos de atuação dos remineralizadores e seu efeito na química do solo. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 3, p. 37–44, 2017.
- Toscani, R. G. da S.; Campos, J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizante natural em solos lixiviados. **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 259–274, 2017.
- Trumper, K. et al. **The natural fix? The role of ecosystems in climate mitigation**. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP), 2009.
- USGS (U.S. Geological Survey). **USGS Spectral Library Version 7**. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2017. (Data Series, 1035).
- Vasconcelos, E. S.; Marcante, N. C. Uso combinado de remineralizadores e condicionadores orgânicos para melhoria de solos arenosos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 15, n. 2, p. 102-114, 2020.
- Wang, j.; Wang, x.; Han, y. Determination of carbonate carbon by the difference between total carbon and organic carbon. **Geoderma**, v. 189–190, p. 293–298, 2012.
- Wiedemeier, D. B. et al. Aromaticity and degree of aromatic condensation of char. **Organic Geochemistry**, v. 78, p. 135–143, 2015.
- Zamanian, K.; Pustovoytov, K.; Kuchelmann, S.; Kuypers, M. M. M. Enhanced rock weathering: A potential technology for carbon dioxide removal and soil amendment. **Science of The Total Environment**, v. 550, p. 733-740, 2016.

ANEXOS

Tabela 3 – Resultados da ANOVA/Kruskal-Wallis para atributos químicos e físico do solo de Índice TA < 10 submetidos a doses de REM

Variável	Teste	Estatística (F ou χ^2)	p-valor	Significância	Post hoc?	Comentário post hoc
pH (CaCl₂)	ANOVA	0,861	0,455	ns	Sim	Não houve diferença significativa
MO (g dm⁻³)	ANOVA	7,03	0,014	*	Sim	Houve diferença significativa
P (mg dm⁻³)	ANOVA	27,76	0,0001	*	Sim	Diferenças significativas
CTC (mmol_c dm⁻³)	ANOVA	1,46	0,282	ns	Sim	Não houve diferença significativa

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: As análises foram conduzidas utilizando Análise de Variância (ANOVA) ou o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Os testes post hoc de Tukey foram aplicados quando a ANOVA foi significativa. ns: não significativo ($p > 0,05$); * significativo a $p \leq 0,10$.

Tabela 4 – Resultados da ANOVA/Kruskal-Wallis para atributos químicos e físicos do solo de Índice TA > 10 submetidos a doses de REM

Variável	Teste	Estatística (F ou χ^2)	p-valor	Significância	Post hoc?	Comentário post hoc
pH (CaCl₂)	Kruskal-Wallis	7,75	0,0207	*	Não	Diferença significativa detectada
MO (g dm⁻³)	ANOVA	0,02	0,979	ns	Sim	Não Houve diferença significativa
P (mg dm⁻³)	ANOVA	2,57	0,13	ns	Sim	Não houve diferença significativa
CTC (mmol_c dm⁻³)	ANOVA	0,51	0,6166	ns	Sim	Não houve diferença significativa

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: As análises foram conduzidas utilizando Análise de Variância (ANOVA) ou o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Os testes post hoc de Tukey foram aplicados quando a ANOVA foi significativa. ns: não significativo ($p > 0,05$); * significativo a $p \leq 0,10$.

Tabela 5 – Resultados da ANOVA/Kruskal-Wallis para atributos mineralógicos e magnéticos do solo de Índice TA < 10 submetidos a doses de 3 t ha⁻¹, e 6 t ha⁻¹, REM

Variável	Teste	Estatística (F ou χ^2)	p-valor	Significância	Post hoc?	Comentário post hoc
Argila (%)	ANOVA	0,930	0,4293	ns	Sim	Não houve diferença significativa
SM Hf	ANOVA	10,242	0,0048	*	Sim	Diferença significativa detectada
SM Lf	ANOVA	8,978	0,0072	*	Sim	Diferença significativa detectada
SM (%)	ANOVA	8,052	0,0099	*	Sim	Diferença significativa detectada
Feo (g kg⁻¹)	ANOVA	6,419	0,0185	*	Sim	Diferença significativa detectada

Fed (g kg⁻¹)	ANOVA	8,846	0,0075	*	Sim	Diferença significativa detectada
LMA Ct	ANOVA	3,502	0,0750	ns	Sim	Tendência a diferença significativa detectada
DMC Ct	ANOVA	2,145	0,1730	ns	Sim	Não houve diferença significativa
LMA Gb	ANOVA	7,533	0,0120	*	Sim	Diferença significativa detectada
DMC Gb	ANOVA	14,584	0,0015	*	Sim	Diferença significativa detectada
Ct/(Ct+Gb)	ANOVA	0,297	0,7501	ns	Sim	Não houve diferença significativa
Teor de Gt (g kg⁻¹)	ANOVA	0,573	0,5831	ns	Sim	Não houve diferença significativa
Teor de Hm (g kg⁻¹)	ANOVA	3,115	0,0938	ns	Sim	Tendência a diferença significativa detectada
LMA Gt 111	ANOVA	0,752	0,4990	ns	Sim	Não houve diferença significativa
DMC Gt 111	ANOVA	3,511	0,0746	ns	Sim	Tendência a diferença significativa detectada
LMA Gt 110	ANOVA	1,106	0,3718	ns	Sim	Não houve diferença significativa
DMC Gt 110	ANOVA	1,053	0,3883	ns	Sim	Não houve diferença significativa
LMA Hm 110	ANOVA	2,120	0,1760	ns	Sim	Não houve diferença significativa
DMC Hm 110	ANOVA	2,087	0,1800	ns	Sim	Não houve diferença significativa
LMA Hm 012	ANOVA	0,513	0,6155	ns	Sim	Não houve diferença significativa
DMC Hm 012	ANOVA	0,283	0,7599	ns	Sim	Não houve diferença significativa

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: As análises foram conduzidas utilizando Análise de Variância (ANOVA). Os testes post hoc de Tukey foram aplicados quando a ANOVA foi significativa. ns: não significativo ($p > 0,10$); * significativo a $p \leq 0,10$.

Tabela 6 – Resultados da ANOVA/Kruskal-Wallis para atributos mineralógicos e magnéticos do solo de Índice TA > 10 submetidos a doses de 3 t ha⁻¹, e 6 t ha⁻¹, REM

Variável	Teste	Estatística (F ou χ^2)	p-valor	Significância	Post hoc?	Comentário post hoc
Argila (%)	Kruskal-Wallis	1,165	0,5585	ns	Não	Não houve diferença significativa
SM Hf	ANOVA	3,302	0,0840	ns	Sim	Tendência a diferença significativa detectada
SM Lf	ANOVA	3,915	0,0598	*	Sim	Diferença significativa detectada
SM (%)	ANOVA	0,672	0,5346	ns	Sim	Não houve diferença significativa

Feo (g kg ⁻¹)	ANOVA	6,010	0,0220	*	Sim	Diferença significativa detectada
Fed (g kg ⁻¹)	ANOVA	8,681	0,0079	*	Sim	Diferença significativa detectada
LMA Ct	ANOVA	1,568	0,2604	ns	Sim	Não houve diferença significativa
DMC Ct	ANOVA	2,588	0,1295	ns	Sim	Não houve diferença significativa
LMAGb	ANOVA	3,430	0,0781	ns	Sim	Diferença significativa detectada
DMC Gb	ANOVA	8,372	0,0088	*	Sim	Diferença significativa detectada
Ct/(Ct+Gb)	Kruskal-Wallis	1,077	0,5836	ns	Não	Não houve diferença significativa
Teor de Gt (g kg ⁻¹)	ANOVA	95,017	0,0000	*	Sim	Diferença significativa detectada
Teor de Hm (g kg ⁻¹)	ANOVA	29,974	0,0001	*	Sim	Diferença significativa detectada
LMA Gt 111	ANOVA	86,845	0,0000	*	Sim	Diferença significativa detectada
DMC Gt 111	Kruskal-Wallis	7,423	0,0244	*	Não	Diferença significativa detectada
LMA Gt 110	ANOVA	46,582	0,0000	*	Sim	Diferença significativa detectada
DMC Gt 110	ANOVA	6,862	0,0155	*	Sim	Diferença significativa detectada
LMA Hm 110	ANOVA	34,554	0,0001	*	Sim	Diferença significativa detectada
DMC Hm 110	ANOVA	9,958	0,0052	*	Sim	Diferença significativa detectada
LMA Hm 012	ANOVA	0,195	0,8263	ns	Sim	Não houve diferença significativa
DMC Hm 012	ANOVA	2,149	0,1726	ns	Sim	Não houve diferença significativa

Tabela 9 – Médias e desvios-padrão dos atributos químicos e físicos do solo, conforme tratamento e tipo de solo

Atributos	Solo	Solo Índice TA < 10			Solo Índice TA < 10		
	Tratamento	Control e	3 t ha ⁻¹ REM	6 t ha ⁻¹ REM	Control e	3 t ha ⁻¹ REM	6 t ha ⁻¹ REM
pH (CaCl ₂)	Média	4,95	4,89	4,86	6,46	6,68	6,67
	DP	0,17	0,05	0,03	0,06	0,13	0,09
MO (g dm ⁻¹)	Média	15,83	16,85	19,62	22,69	22,40	22,52
	DP	0,55	0,55	2,45	3,18	1,45	0,39
P (mg dm ⁻¹)	Média	35,70	14,04	23,18	23,23	31,2	38,29
	DP	2,86	3,71	5,4	7,26	12,09	8,09
CTC (mmolc dm ⁻¹)	Média	54,98	56,36	65,13	91,63	91,96	96,19
	DP	4,08	1,61	15,16	7,83	3,59	8,85
Teor Argila	Média	26,12	26,72	26,93	47,34	48,60	49,23

DP	0,59	1,19	1,19	2,41	3,17	2,52
-----------	------	------	------	------	------	------

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: As análises foram conduzidas utilizando Análise de Variância (ANOVA). Os testes post hoc de Tukey foram aplicados quando a ANOVA foi significativa. ns: não significativo ($p > 0,10$); * significativo a $p \leq 0,10$.

Tabela 10 – Médias e desvios-padrão de atributos mineralógicos e magnéticos dos solos sob diferentes tratamentos

Atributos	Solo	Solo Índice TA < 10			Solo Índice TA > 10			
		Tratamento	Controle	3 ton ha ⁻¹ REM	6 ton ha ⁻¹ REM	Controle	3 ton ha ⁻¹ REM	6 ton ha ⁻¹ REM
Teor Argila (%)	Média		26,12	26,72	26,93	47,34	48,60	49,23
	DP		0,59	1,19	1,19	2,41	3,17	2,52
SM Hf	Média		2,85	3,19	3,02	24,45	26,56	24,65
	DP		0,07	0,13	0,11	1,74	1,19	0,71
Sm Lf	Média		3,03	3,36	3,17	26,97	29,44	27,26
	DP		0,08	0,14	0,11	1,88	1,21	0,76
SM (%)	Média		5,79	5,26	4,97	9,35	9,76	9,57
	DP		0,35	0,2	0,32	0,42	0,67	0,35
Fe g kg ⁻¹	Média		4,52	4,73	5,06	7,98	9,06	8,92
	DP		0,2	0,1	0,3	0,3	0,52	0,57
Fed g kg ⁻¹	Média		29,33	33,35	33,63	59,8	67,95	71,87
	DP		1,36	1,98	1,44	3,7	2,45	5,71
LMA Ct	Média		0,3	0,27	0,33	0,4	0,43	0,44
	DP		0,03	0,02	0,05	0,03	0,04	0,03
DMC Ct (nm)	Média		27,72	31,49	30,16	24,57	19,38	19,06
	DP		2,62	2,66	2,56	6,27	1,83	1,34
LMA Gb	Média		0,2	0,14	0,15	0,09	0,15	0,15
	DP		0,03	0,01	0,03	0,03	0,05	0,03
DMC Gb (nm)	Média		50,48	61,3	52,56	108,54	64,75	58,95
	DP		3,98	3,19	1,05	28,66	12,99	7,96
Ct/Ct+Gb	Média		0,82	0,81	0,81	0,56	0,52	0,53
	DP		0,01	0	0,02	0,18	0,04	0,03
Teor Gt (g kg ⁻¹)	Média		9,47	10,21	9,3	23,18	4,03	4,16
	DP		1,35	1,52	0,92	3,8	0,44	0,85
Teor Hm (g kg ⁻¹)	Média		26,95	31,74	32,48	57,63	80,59	87,29
	DP		3,39	3,63	3,17	5,91	3,04	7,26
LMA Gt 111	Média		0,36	0,32	0,36	0,58	0,18	0,5
	DP		0,04	0,05	0,07	0,02	0,05	0,06
DMC Gt 111 (nm)	Média		27,07	27,33	46,27	20,14	52,08	18,41
	DP		7,72	3,15	18,57	10,03	16,28	4,1
LMA Gt 110	Média		0,36	0,32	0,38	0,46	0,17	0,16
	DP		0,06	0,06	0,06	0,08	0,03	0,02
DMC Gt 110 (nm)	Média		24,31	27,53	23,05	20,64	51,32	43,12
	DP		4,27	4,99	4,22	4,69	8,48	18,64
LMA Hm 110	Média		0,19	0,19	0,18	0,25	0,19	0,17
	DP		0	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
DMC Hm 110 (nm)	Média		46,09	45,36	50,45	35,03	49,18	49,02
	DP		0,59	3,72	5,43	1,38	7,72	4,25
LMA Hm 012	Média		0,26	0,28	0,25	0,26	0,28	0,27

	DP	0,02	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04
DMC Hm 012 (nm)	Média	61,19	59,43	59,38	111,23	72,53	58,2
	DP	3,02	3,61	4,77	62,32	13,94	11,16

Tabela 10. Médias e desvios-padrão (DP) dos atributos mineralógicos, químicos e magnéticos de solos contrastantes (Latosolo Vermelho distrófico originado de basalto – TA > 10, e Latossolo Vermelho álico originado de arenito – TA < 10), após aplicação de remineralizador de rocha (REM) em casa de vegetação. Os tratamentos consistiram em controle (sem aplicação), 3 t ha⁻¹ REM e 6 t ha⁻¹ REM, com quatro repetições. Foram avaliadas variáveis relacionadas à cristalinidade e tamanho de cristal de goethita (Gt) e hematita (Hm), proporções relativas (Gt/(Gt+Hb), Gt/(Gt+Hm)), diâmetro médio de cristal (DMC) e área de pico por difração de raios X (DRX), além dos teores de ferro extraível (FeO, FeD), razão de susceptibilidade magnética em alta e baixa frequência (SM Hf e SM Lf) e sua proporção (SM%). Os valores médios são expressos com seus respectivos desvios-padrão, com base em n = 4.