

REMINERALIZAÇÃO DE SOLO AGRÍCOLA: ESTUDO DAS ALTERAÇÕES QUÍMICAS DECORRENTES DE INTEMPERISMO ACELERADO

 <https://doi.org/10.56238/arev7n3-120>

Data de submissão: 13/02/2025

Data de publicação: 13/03/2025

Adalgisa de Jesus Pereira Santana
Jeferson Klein
Olmede Celestino Santos Filho
Mariana Lacerda Figueira Menezes

RESUMO

A remineralização de solos no Brasil tem ganhado destaque no mundo por ser fonte de nutrientes ao solo, pela capacidade de formar novas fases cristalinas. Também conhecido como intemperismo acelerado de rochas, essa prática tem apresentado potencial para recuperação química e física de solos agrícolas. Possui ainda o apelo da descarbonização via intemperismo de rochas que de fato tende a ocorrer mais rapidamente quando comparado com condições naturais de formação de solos. Esta pesquisa teve como objetivo analisar os efeitos e potencial de remineralização de dois solos agrícolas utilizando uma solução sustentável de Xisto Compacto com teores de Ca e Mg oriundo rejeitos de mineração da região de Itabira/MG. O experimento foi conduzido em duas localidades. Um em Nazareno em Minas Gerais e o outro em Piracicaba em São Paulo. O pó de rocha foi moído a 0,106mm e aplicado a lanço na dosagem de 22 ton/ha. Em ambas as localidades o material foi depositado sob o solo e incorporado com auxílio de grade aradora até a profundidade de 30cm. O experimento instalado em Piracicaba foi irrigado até capacidade de campo e o ensaio em Nazareno aguardou a regularidade das chuvas da região. Em ambas as localidades o delineamento experimental foi em blocos casualizados com 5 tratamentos e 6 repetições. Para os experimentos foram adotados os tratamentos controle (T1 sem aplicação), T2 de xisto compacto puro, T3 Calcário dolomítico em Nazareno-MG e calcíticos em Piracicaba-SP puros, T4 de xisto compacto adicionado de calcário dolomítico e calcítico (Nazareno-MG e Piracicaba-SP respectivamente), e o T5 de remineralizador de mercado (Agrifértil Mg+ em Nazareno-MG e ErgoFert Grow+ em Piracicaba-SP). Foram analisados os indicadores químicos/agronômicos da qualidade do solo. O xisto compacto modificou o pH do solo durante o período experimental. O xisto compacto apresentou comportamento superiores ao calcário comercial para os indicadores de pH (CaCl_2 e H_2O), saturação por base, Alumínio trocável (Al^{3+}) e Acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$). Esses resultados foram similares aos dos calcários isolados e combinados para os indicadores CTC Efetiva (t) e Soma de bases (SB).

Palavras-chave: Condicionadores. Fertilidade. Pó de Rocha. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A remineralização dos solos por meio da aplicação de pó de rocha tem como objetivo restaurar a fertilidade, aumentar a produtividade agrícola e fortalecer o ecossistema do solo. Essa prática tem ganhado destaque por oferecer uma alternativa sustentável ao esgotamento dos solos, causado por práticas agrícolas intensivas em solos tropicais, além de contribuir para a preservação ambiental e a segurança alimentar (Junior et al., 2022).

Os pós de rocha utilizados na remineralização podem ser derivados de materiais vulcânicos, como basalto, ou de rochas silicáticas ígneas, sedimentares e metamórficas. Os remineralizadores são extraídos de rochas silicáticas e apresentam alta cristalinidade e baixa solubilidade em água, liberam os minerais de forma gradual. Essa liberação depende das interações com a atmosfera, água e solo, que promovem a disponibilização de elementos essenciais, melhorando a estrutura química e física do solo. Os pós de rocha, além de fornecer macro e micronutrientes, podem equilibrar o pH e favorecer a formação de minerais secundários, essenciais para a produtividade das culturas agrícolas (Martins et al., 2023; Steiner et al., 2017; Smith et al., 2023).

Na produção agropecuária contemporânea, práticas de manejo sustentável, como o plantio direto e o uso de remineralizadores, vêm sendo adotadas para proteger o solo e garantir sua capacidade produtiva a longo prazo. Esses materiais liberam nutrientes de maneira controlada, reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos e promovendo um macro e microambiente adequado ao desenvolvimento vegetal (Ribeiro et al., 2020). O uso de remineralizadores, auxiliam na neutralização de Al^{3+} tóxico à maioria das commodities agrícolas, tornam as plantas mais resistentes a pragas e doenças e aumento a resistência a estresse bióticos e abióticos (Manning, 2018).

Um aspecto relevante do uso de remineralizadores em solos tropicais é a regionalização das fontes de produção desses insumos. Resíduos da mineração de ferro, quando processados corretamente, podem ser transformados em pó de rocha para remineralização agrícola, reduzindo passivos ambientais e incentivando a economia circular. Esse reaproveitamento diminui o acúmulo de materiais sem aplicação econômica e reduz o impacto ambiental da mineração de ferro, tornando-se uma solução não clichê sustentável para a recuperação do solo e a preservação dos recursos naturais (Carvalho et al., 2018; Blaskowski et al., 2019).

Considerando a importância da sustentabilidade na agricultura, é essencial adotar estratégias de manejo que preservem o solo e garantam a eficiência produtiva no longo prazo. O uso de remineralizadores se apresenta como uma alternativa viável, promovendo a fertilidade do solo, reduzindo a dependência de insumos químicos e apoiando uma produção agrícola mais equitativa e

sustentável. Assim, esta pesquisa busca analisar a ação química dos remineralizadores, explorando seu potencial de uso no solo a partir de estéreis da mineração.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Após o recebimento, identificação e pesagem das amostras, estas foram homogeneizadas e britadas 100% <3,35 mm em britador de mandíbula em escala de bancada. Em seguida, a amostra britada foi homogeneizada em pilha cônica e alongada, quarteando alíquotas para análise granulométrica da alimentação da moagem. O restante da amostra britada foi direcionado para circuito de moagem piloto, objetivando P100 0,106 mm em moinho de bolas Furlan. O moinho foi alimentado com 50kg/h e rotação de 30 RPM. O material moído foi homogeneizado e quarteado em alíquotas para análise química e Difratometria de raio x. determinação dos teores totais dos elementos e das fases cristalinas por difração de raio x (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química do Xisto Compacto e identificação de fases cristalinas por difração de raios X (DRX).

Litologia		Parâmetros Químicos									
Xisto compacto	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O		
	7,01	49,40	11,04	0,046	0,128	10,211	7,249	0,829	0,199		
Difração de Raios X											
Fase cristalina	Clorita			Calcita	Albita	Quartzo	Dolomita	Anfíbolio			
Fórmula química	(Mg,Fe) ₃ (Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆			Ca(CO ₃)	(Na,Ca)AlSi ₃ O ₈	SiO ₂	(CaMg(CO ₃) ₂)	(Mg,Fe) ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈			
%	38,4			19,3	17,2	11,5	9,8	3,8			
PRNT (%)	23,6										
Reatividade (%)	99,1										

2.1 ÁREA EXPERIMENTAL E CONDUÇÃO DOS ENSAIOS

Dois experimentos estão sendo conduzidos em solos de diferentes classes texturais e químicas, localizados em Piracicaba-SP e Nazareno-MG. O primeiro experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em Piracicaba-SP, enquanto o segundo foi conduzido em um Latossolo Vermelho Amarelo em Nazareno-MG.

A dose de pó de rocha aplicada foi ajustada para 22,7 toneladas por hectare, visando aumentar a superfície de contato de remineralização do solo. Para garantir a elevação da saturação por bases (V) para 70%, a quantidade de corretivos foi calculada de acordo com os resultados químicos da análise de solo antes da aplicação. Antes da implantação dos experimentos, foram realizadas análises laboratoriais para caracterização química, física e de micronutrientes desses solos, estabelecendo uma linha de base para comparação das alterações ao longo do período experimental.

Os experimentos foram estruturados sob delineamento experimental em blocos casualizados com cinco tratamentos distintos e seis repetições, sendo as parcelas experimentais dimensionadas em 3 metros de largura por 5 metros de comprimento. Dentro dessas parcelas, a área útil, destinada às coletas e análises, compreendeu 1,5 metro de largura por 3 metros de comprimento, totalizando 4,5 m². A área total ocupada pelo experimento foi de 1.100 m² (Figura 1).

Figura 1. Croqui do ensaio com delimitação de parcelas e tratamentos em ambas as localidades.

B1	B2	B3	B4	B5	B6	
T1	T2	T3	T4	T5	T1	5
3	2					2
T4	T3	T1	T3	T2	T5	
T2	T5	T4	T1	T3	T2	
T5	T4	T5	T2	T1	T3	
T3	T1	T2	T5	T4	T4	

Os tratamentos específicos para cada tipo de solo foram estabelecidos no mesmo desenho experimental. No primeiro experimento, conduzido no Latossolo Vermelho-Amarelo em Nazarenó-MG, os tratamentos aplicados foram:

1. Controle (sem aplicação) – sem aplicação de remineralizadores;
2. Xisto Compacto (Xc);
3. Calcário Dolomítico (Cd);
4. Xisto Compacto + Calcário Dolomítico (Xc + Cd);
5. Agrifértil Mg+ (AMg).

A incorporação dos materiais foi realizada na camada de 0-30 cm, utilizando uma gradagem aradora de 36 polegadas, seguida por uma gradagem niveladora para homogeneização do solo e melhor distribuição dos tratamentos.

No segundo experimento, realizado no Latossolo Vermelho-Amarelo-distrófico (LvA-d) em Piracicaba-SP, os tratamentos empregados foram:

1. Controle (Sem aplicação) – sem aplicação de remineralizadores;
2. Xisto Compacto (Xc);
3. Calcário Calcítico Comercial (Cd);
4. Xisto Compacto + Calcário Calcítico Comercial (Xc + Cc);
5. ErgoFert Grow (Ef).

2.2 AVALIAÇÕES E COLETAS DE AMOSTRAS

Para avaliar os efeitos dos tratamentos ao longo do tempo, foram realizadas análises químicas e físicas do solo em diferentes períodos e profundidades. As coletas de solo ocorreram nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm (Piracicaba-SP) e 0-15 cm e 15-30cm (Nazareno-MG), permitindo uma avaliação detalhada da mobilidade dos nutrientes e da influência dos remineralizadores em diferentes profundidades do perfil do solo. As amostragens foram realizadas antes da instalação dos experimentos e nos períodos de 30, 60, 90 e 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

A coleta de amostras seguiu um protocolo Embrapa (2017) para obtenção do solo, o qual foi devidamente homogeneizado para formação de amostras compostas representativas de cada parcela experimental. Essas amostras foram enviadas para análises laboratoriais, nas quais foram determinados os parâmetros de fertilidade do solo, incluindo pH, matéria orgânica, teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes essenciais (Fe, Mn, Zn, Cu, B). Foram realizadas análises granulométricas para determinar a textura do solo, utilizando o método da pipeta para quantificação dos teores de argila, silte e areia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de se avaliar o antes e depois das características químicas dos solos onde os experimentos foram implantados, foram realizadas as análises de solo antes da aplicação do Xisto Compacto (Tabela 2 e 3). Os resultados das análises indicam o estado químico do solo que comprova a necessidade de aporte de minerais, comum em solos tropicais. Indicadores como pH e Soma de Bases direcionam os teores e volumes a serem aportados do remineralizador.

Tabela 2. Análise química e de micronutrientes de Latossolo vermelho amarelo da área experimental com amostragem realizada em Piracicaba-SP.

Prof. cm	pH <i>H₂O</i>	P-M1 <i>mg/dm³</i>	K <i>mg/dm³</i>	S <i>mg/dm³</i>	Ca <i>cmol_c/dm³</i>	Mg <i>cmol_c/dm³</i>	t <i>cmol_c/dm³</i>	V <i>%</i>	MOS <i>%</i>	B <i>mg/dm³</i>	Cu <i>mg/dm³</i>	Fe <i>mg/dm³</i>	Mn <i>mg/dm³</i>	Zn <i>mg/dm³</i>
0-20	4,6	2	3,7	13	29	15	8,9	50	19	0,39	8,8	20	27,2	2,6
20-40														

Tabela 3. Análise química e de micronutrientes de Latossolo vermelho amarelo da área experimental com amostragem realizada em Nazareno-MG.

Prof. cm	pH <i>H₂O</i>	P-M1 <i>mg/dm³</i>	K	S	Ca	Mg <i>cmol_c/dm³</i>	t	V %	MOS	B	Cu	Fe	Mn	Zn
0-20	5,4	8	78,2	47	1,5	0,4	8,2	26	3,7	0,51	1,7	34	15,7	1,7
20-40	5,5	3	66,5	78	1,1	0,2	6,7	22	2,8	0,41	1,5	38	9,5	0,8

*P-M1 = P extraído por Mehlich1. **Cu, Fe, Mn e Zn extraídos por Mehlich1.

De acordo com Raij et al. (2001) a acidez do solo é um importante fator que limitam a produção em regiões tropicais. Os autores destacam que a calagem altera os atributos químicos do solo ligados à acidez, elevando o pH, elevando os níveis de cálcio, magnésio, soma de bases e saturação por bases, além de diminuir os teores de alumínio tóxico, até profundidades de 60 cm. Essas práticas são categoricamente demandadas para melhorar a fertilidade imediata dos solos tropicais e aumentar ou manter a produtividade agrícola.

De forma geral os parâmetros analisados se referem à acidez e a disponibilidade de cátions no solo. O experimento instalado em Nazareno-MG resultou em aumento em 1,1% do pH (CaCl₂) indicando forte aptidão para correção de solo. Neste mesmo experimento, comparando os tratamentos com xisto compacto puro ou combinado com calcário dolomítico com o tratamento controle e do calcário dolomítico puro aumentaram significativamente o pH em CaCl₂ e em H₂O, diminuíram o teor de alumínio trocável (Al³⁺) e a acidez potencial (H+Al), além de elevarem a soma de bases (SB) e a saturação por bases (V%). Como esperado, no tratamento controle, não houve variação nos valores de Al³⁺ e H+Al e apresentou os menores pH, SB e V%, indicando a acidez elevada do solo não corrigido. Avaliado como um tratamento controle positivo, o produto comercial Ergofert, um condicionador alternativo, também propiciou incremento na fertilidade do solo, porém em menor proporção que os tratamentos à base de xisto ou calcário (Tabela 4).

No experimento de campo instalado em Piracicaba-SP o tratamento composto pelo Xisto Compacto isolado performou com elevação do pH em CaCl₂ e em H₂O. Os indicadores V% e SB obtiveram as maiores médias significativas, seguindo o mesmo padrão de neutralização de Al³⁺ e redução da acidez potencial observado no experimento de campo instalado em Nazareno-MG. A combinação de Xisto Compacto com Calcário Calcítico e o próprio Calcário Dolomítico também proporcionaram melhorias químicas ao solo, porém performaram com médias um pouco mais baixas que o tratamento de xisto isolado. O corretivo AMg⁺ diminuiu a acidez do solo em menor proporção quando comparado aos demais tratamentos e se mostrou superior somente ao tratamento controle, que permaneceu com maior concentração de Al³⁺ e H+Al.

Os resultados indicam a eficácia do Xisto Compacto na correção da acidez do solo, com desempenho igual ou superior em determinados indicadores comparado aos calcários tradicionais.

Não se deve perder de vista que tanto o calcário dolomítico quanto o calcítico são produtos bem estabelecidos no mercado e largamente utilizados, pois melhoram o pH e suprem a demanda de Ca e Mg, dependendo da necessidade do solo. Outros condicionadores, como Ergofert e AMg⁺, podem contribuir para a melhora das características químicas, porém com resultados de neutralização de acidez e aumento do pH não tão eficientes quanto aos verificados nos tratamentos com xisto e/ou calcário.

De acordo com autores (Ribeiro et al.1999, Sousa & Lobato, 2004), a faixa de pH entre 5,5 e 6,5 é adequada para muitas culturas agrícolas pois reduz a toxidez por alumínio e favorece a disponibilidade de nutrientes (Malavolta, 2006). Portanto, a elevação do pH e a redução de Al³⁺ não são negociáveis para garantir a criação de um ambiente radicular e elevar potencial de crescimento vegetal (Raij, 2001). De acordo com Embrapa (2018) a saturação por bases (V%) acima de 50% é geralmente desejável em solos tropicais, tendo sido atingida pelos tratamentos à base de xisto e calcário. Importante ressaltar que a escolha do corretivo ou material remineralizador deve considerar aspectos como a disponibilidade de Mg no solo, o custo-benefício, a velocidade de reação e o objetivo final de saturação por bases ou pH a ser atingido.

Tabela 4. Resumo da análise de variância e comparação das médias dos indicadores químicos de fertilidade de Latossolo vermelho amarelo em Nazareno-MG(A) e Latossolo vermelho amarelo distrófico em Piracicaba SP (B)

A	pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m
Fonte de Variação								
Xisto Compacto (Xc)	5,8a	6.51a	65,60a	6,68a	6,66a	0,027c	3,44c	1.77c
Xisto + calcário dolomítico	5,7a	6.48a	64,77a	6,64a	6,61a	0,030c	3,5c	2.39c
Calcário dolomítico (Cd)	5,7a	6.53a	65,59a	6,88a	6,87a	0,015c	3,38b	2.72c
Ergofert	5,0b	6.14b	53,78b	5,43b	5,33b	0,099b	4,5b	5.18b
Controle	4,7c	5.99c	48,46c	4,94c	4,75c	0,19a	5,03a	10.66a
CV (%)	6,46	2.86	9,42	13,81	14,43	89,93	12,73	83.09
B								
Fonte de Variação								
Xisto Compacto	5,12a	5,72a	46,93a	7,17a	34,28a	0,59c	37.41c	0.29c
Xisto Compacto + Calcário calcítico	4,95b	5,55b	43,52ab	6,93ab	30,76a	0,62c	38.56bc	0.33c
Calcário calcítico	4,93b	5,53b	41,89b	7,19ab	30,13a	0.75ab	41.81b	0.16c
Agrifértil Mg ⁺	4,66c	5,2c	31,54c	7,05ab	22,35b	0.98b	48.18b	1.04b
Controle	4.47d	5,07d	23,97d	7,033b	16,78c	1.67a	53.5a	1.95a
CV (%)	5,03	4,48	23,21	6,9	28,03	62,58	13,79	92.72

As médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferença significativa pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 5. Análise de variância e comparação das médias dos indicadores químicos de fertilidade de Latossolo vermelho amarelo Piracicaba - SP.

	Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio							
			pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m
LvA-d Piracicaba-SP	Tratamentos	4	11,128*	3,020*	3213,26*	36,383*	42,52*	0,258*	27,34*	27,28*
	Data	3	1,539*	0,124*	1418,01*	21,071*	22,29*	0,034*	15,14*	4,42*
	Profundidade	1	1,773*	0,111**	550,03*	18,59*	20,92*	0,070*	0,88**	9,20*
	Bloco	5	0,307*	0,079*	140,89*	2,88*	3,33*	0,016*	0,761*	2,088*
	Resíduo	199	0,124	0,032	31,76	0,71	0,761	0,004	0,258	0,49
	Cv (%)		6,46	2,86	9,42	13,81	14,43	89,93	12,73	92,72
*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste Tukey. ** Não significativo.										
	Data	pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m	
	30	5,31b	9,49c	53,95c	5,24b	5,14b	0,097a	4,34a	1,07a	
	60	5,35b	10,68a	57,81b	6,26a	6,19a	0,070ab	4,49a	0,67bc	
	90	5,47b	10,08b	62,90a	6,44a	6,40a	0,040b	3,68b	0,43c	
	120	5,66a	9,89b	64,60a	6,52a	6,44a	0,080b	3,45b	0,85ab	
	Profundidade	pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m	
	0-20cm	5,53a	10,27a	61,33a	6,39a	6,34a	0,05a	3,93a	6,34a	
	20-40cm	5,36b	9,80b	58,30b	5,84b	5,75b	0,08b	4,05a	5,75b	

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade. V%: Saturação por base. t: CTC Efetiva. SB: Soma de Bases. Al³⁺: Alumínio trocável. H+Al: Acidez Potencial. m: Saturação por Alumínio.

Os resultados obtidos na análise de variância (Tabela 5) e na comparação de médias dos indicadores de fertilidade (pH em CaCl₂, pH em H₂O, saturação por bases – V%, CTC efetiva – t, soma de bases – SB, Alumínio trocável – Al³⁺, acidez potencial – H+Al e saturação por alumínio – m) em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA-d) de Piracicaba (SP) indicam o comportamento de disponibilização mineral do solo em função dos tratamentos, das datas de coleta de amostras para realização de análise de solo e da profundidade do perfil de solo.

De maneira geral, a análise de variância confirma que os tratamentos testados e o fator tempo tiveram impacto significativo nos atributos de fertilidade, reforçando a importância de realizar correções de solo e monitorar as mudanças ao longo dos ciclos agrícolas (Embrapa, 2018). Além disso, a estratificação dos resultados por profundidade indica a necessidade de manejo adequado para que as melhorias químicas possam atingir camadas mais profundas, melhorando o ambiente radicular e a sustentabilidade do sistema de produção (Sousa & Lobato, 2004).

Tabela 6. Resumo da análise de variância dos indicadores químicos do solo LVA em Nazareno – MG

	Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio							
			pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m
LvA-Nazareno-MG	Tratamentos	4	3,24*	3,24*	4355,12*	56,76*	2433,95*	9,52*	22,25*	641,99*
	Data	3	0,61*	0,61*	728,49*	4023,99*	623,52*	21,16*	24,8*	184,63*
	Profundidade	1	1,40*	1,40*	3047,21*	2604,38*	3237,38*	0,43*	30,25*	158,28*
	Bloco	5	0,43*	0,43*	504,01*	497,08*	381,13*	2,09*	46,01*	113,36*
	Resíduo	199	0,05	0,05	76,90	23,84	5578	0,33	34,30	14,29
	Cv (%)		4,95	4,40	23,34	6,90	27,80	62,75	13,34	8309
	Data	pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m	
	30	4,94a	5,54a	36,43bc	82,16a	30,12a	0,43b	51,96a	3,05b	
	60	4,84a	5,44a	39,45ab	62,63c	25,21b	0,39b	37,46c	3,43b	
	90	4,70b	5,30b	33,25c	69,28b	23,18a	1,51a	45,95b	6,93a	
	120	4,83a	5,43a	41,16a	69,06b	28,93a	1,36a	40,20c	4,78a	
	Profundidade	pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	V%	t	SB	Al ³⁺	H+Al	m	
	0-20cm	4,90a	5,50a	41,16a	74,10a	30,56a	0,96a	44,24a	3,73b	
	20-40cm	4,75b	5,35b	34,04b	67,52b	23,22b	0,88a	43,53a	5,35a	

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade. *Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste Tukey. ** Não significativo. V%: Saturação por base. t: CTC Efetiva. SB: Soma de Bases. Al³⁺: Alumínio trocável. H+Al: Acidez Potencial. m: Saturação por Alumínio.

A análise de variância (ANOVA) aplicada aos dados indicou diferenças estatisticamente significativas ($p<0,05$) para a maioria dos indicadores químicos do solo em função dos fatores de variação tratamentos, datas de avaliação e profundidade (Tabela 6). As tabelas de médias comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade confirmaram que as médias com letras diferentes se distinguem estatisticamente, de modo que as estratégias de correção da acidez adotadas e o período de avaliação (30, 60, 90 e 120 dias após incorporação) modificam as propriedades químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) em Nazareno (MG).

A variação no pH (CaCl₂ e H₂O) ao longo do tempo (datas) de avaliação foram afetados pela aplicação do xisto isolado e do xisto combinado com calcário. A intensão foi perceber a velocidade de mineralização dos elementos a cada 30 dias. Desta forma 30 dias após incorporação do xisto compacto, o pH (CaCl₂) possibilitou elevação do pH, diferenciando-se de períodos posteriores. De maneira geral, a resposta inicial dos corretivos elevou o pH de modo significativo, no entanto, aos 90 dias, observou-se um decréscimo nesse indicador, mostrando um possível ajuste químico em solução do solo no processo de neutralização (Zhang et al., 2020; Kumar et al., 2022). Aos 120 dias, o pH

voltou a subir, não diferindo estatisticamente de 30 e 60 dias, o que sugere uma possível estabilização do efeito corretivo ao final desse intervalo de avaliação no de tempo (Wang et al., 2024).

De maneira análoga, a saturação por bases (V%) também variou ao longo do tempo: a leitura inicial (30 dias), aumentando e chegando a 41,16% aos 120 dias, confirmado a tendência de elevação gradativa da disponibilidade de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) no complexo de troca (Smith et al., 2023). Entretanto, aos 90 dias, houve um valor mínimo relativo de V%, indicando uma flutuação que pode estar relacionada à solubilização dos corretivos e às condições de umidade e temperatura do solo durante o período (Lopez et al., 2022). O comportamento cíclico observado reforça a importância de avaliações periódicas para verificar se a calagem está atingindo efetivamente os objetivos de neutralização do Al^{3+} e elevação das bases (Roy et al., 2025).

O parâmetro CTC efetiva (t) em 30 dias, atingiu 82,16 cmolc dm^{-3} , superando significativamente as demais datas, como 60 dias, 90 e 120 dias. Essa diferença estatística indica que, num primeiro momento, a presença de íons liberados pelos corretivos e a dinâmica de troca catiônica elevou a quantidade de cargas ocupadas no solo, possivelmente resultando em maior disponibilidade imediata de nutrientes (Ding et al., 2023).

Com o passar do tempo, a redução dos valores de CTC efetiva sugere reações secundárias de adsorção e/ou precipitação, além de possíveis variações na forma do alumínio (Kumar et al., 2021).

Um aspecto crítico para a interpretação estatística está relacionado ao alumínio trocável (Al^{3+}), cujo pico foi observado aos 90 dias, diferenciando-se significativamente das médias em 30 e 60 dias, que foram mais baixas. Tal elevação temporária do Al^{3+} pode ser explicada pela liberação de formas inorgânicas de alumínio da fase sólida do solo após a aplicação de corretivos, associada à competição catiônica no complexo de troca (Martínez-Ballesta et al., 2024). Posteriormente, aos 120 dias, o Al^{3+} permaneceu em patamar elevado, sem diferir estatisticamente aos 90 dias, mas ainda superior aos valores iniciais. Do ponto de vista técnico o resultado estatístico indica a necessidade de monitorar não apenas o pH, mas também a dinâmica do alumínio em diferentes estágios de correção, pois ele pode momentaneamente retornar ao sistema dependendo das reações químicas e biológicas em curso (Kumar et al., 2022).

A comparação estatística por profundidade demonstra a estratificação na resposta dos atributos químicos. O pH em CaCl_2 , V% e SB apresentaram resultados estatisticamente significativamente maiores na camada superficial (0-20 cm de profundidade). Essa diferença reflete a maior efetividade da calagem na camada onde o corretivo foi aplicado e incorporado, confirmando achados recentes de que a mobilidade dos íons básicos nem sempre é suficiente para corrigir camadas subsuperficiais no mesmo grau (Smith et al., 2023; Roy et al., 2025). O valor de Al^{3+} , embora não apresente diferenças

estatisticamente elevadas, ainda sugere um ambiente de menor toxidez na superfície, correlacionando-se positivamente com o aumento do pH nessa camada (Zhang et al., 2020).

Do ponto de vista estatístico, aos coeficientes de variação mais altos para parâmetros como Al^{3+} e H^+Al indicam heterogeneidade no solo e a complexidade das reações de neutralização do alumínio, apontando para a importância de replicações adequadas e amostragem criteriosa (Kumar et al., 2021; Wang et al., 2024). Indicam também que o uso de fonte silicáticas para construção de perfil de solo mais estabilizado quimicamente deve ser considerado num intervalo de tempo maior quando se utiliza fontes mais solúveis de bases como o calcário calcítico ou o dolomítico.

Pode-se inferir que o sucesso da correção de acidez em solos tropicais e intemperizados depende não apenas do produto e da dose aplicada, mas também do tempo de reação, das condições ambientais (chuva, temperatura) e da forma de aplicação (superficial vs. incorporado), aspectos amplamente discutidos na literatura internacional mais recente (Zhang et al., 2020; Ding et al., 2023).

4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a aplicação de xisto compacto como remineralizador de solo, derivado de rejeitos da mineração de ferro na região de Itabira-MG, apresenta-se como uma alternativa eficaz e sustentável para a remineralização de solos agrícolas tropicais. Em ambos os experimentos conduzidos em Nazareno-MG e Piracicaba-SP, o xisto compacto promoveu melhorias significativas nos atributos químicos do solo, causando a elevação do pH (em CaCl_2 e H_2O), a redução do alumínio trocável (Al^{3+}), aumento da saturação por bases (V%) e da soma de bases (SB). Esses efeitos foram comparáveis ou superiores aos observados com o uso de calcários tradicionais dolomítico e/ou calcítico, reforçando seu potencial como corretivo de acidez e fonte que disponibiliza gradualmente os nutrientes.

A granulometria fina (0,106 mm) e a dosagem de 22 ton/ha facilitaram o intemperismo acelerado do material, garantindo liberação progressiva de cátions de CaO e MgO , essenciais para a fertilidade do solo. Contudo, os resultados evidenciaram maior eficácia nas camadas superficiais (0-20 cm de profundidade), indicando a necessidade de estratégias de manejo complementares, como incorporação mecânica ou ajustes na frequência de aplicação, para atingir camadas subsuperficiais. A dinâmica temporal observada, com picos de neutralização de Al^{3+} e oscilações de pH ao longo de 120 dias, ressalta a importância do monitoramento contínuo para tornar mais eficiente a correção da acidez e a disponibilidade de nutrientes.

Além dos benefícios agronômicos, o uso de xisto compacto como remineralizador alinha-se aos princípios da economia circular, ao transformar resíduos minerais em insumos agrícolas,

reduzindo passivos ambientais e promovendo práticas sustentáveis. A combinação do xisto com calcários tradicionais mostrou-se particularmente vantajosa, sugerindo sinergias que podem ampliar a eficiência da correção do solo e reduzir custos e a dependência de fertilizantes sintéticos.

A validação de tecnologias de baixo impacto ambiental na agricultura, destacando o xisto compacto como uma solução viável para a recuperação de solos degradados em regiões tropicais. Futuras pesquisas devem explorar a integração desse material com práticas de manejo conservacionistas, como plantio direto e agroflorestas, além de investigar seus efeitos em longo prazo e em diferentes culturas, visando consolidar sua adoção em sistemas produtivos sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- BLASKOWSKI, A. E. et al. **Potencial agromineral das rochas de descarte da mina de cromita Igueira**, Bahia. 2019.
- CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 90, n. 5, p. 667-673, 1998.
- CARVALHO, A. M. X.; CARDOSO, I. M.; THEODORO, S. H.; SOUZA, M. E. P. Rochagem: o que se sabe sobre essa técnica. In: EMBRAPA (Org.). Solos e Agroecologia. Brasília: Embrapa, 2018. p. 101-128.
- DING, W.; CAO, X.; YAN, F.; ZHOU, G. Dynamic responses of acid soils to lime and organic amendments in tropical agroecosystems. **Soil & Tillage Research**, v. 230, p. 105707, 2023.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- JÚNIOR, J. J. A. et al. Remineralizador de solo utilizado como fertilizante na cultura da soja implantada no cerrado. **Conjecturas**, v. 22, n. 9, p. 402-414, 2022.
- KUMAR, S.; GUO, Z.; LI, K. Advancing liming strategies for sustainable acid soil management: a comprehensive review. **Agricultural Systems**, v. 188, p. 103049, 2021.
- LAL, R. Soil health and climate change: an overview. **Geoderma**, v. 366, p. 114237, 2020.
- LOPEZ, A. M.; HERNANDEZ, J.; CASTELLANOS, L. E. Efficacy of different liming materials on acid soil remediation in tropical agroforestry systems. **Applied Soil Ecology**, v. 176, p. 104495, 2022.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.
- MANNING, D. A. C. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. **Natural Resources Research**, v. 27, n. 2, p. 167-173, 2018.
- MARTÍNEZ-BALLESTA, M. C.; REYES, L. E.; QUINTERO, J. M. Layer-specific improvements in soil fertility through deep liming in Mediterranean acid soils. **Agronomy**, v. 14, n. 12, p. 3081, 2024.
- MARTINS, E. DE S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. **Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos**. 2023.
- NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- OLIVEIRA, C. M.; MARQUES, J. J. Uso de resíduos de mineração na agricultura: uma revisão sobre a aplicação de estéreis como remineralizadores de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 3, p. 245-256, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n3p245-256/2021>.

PEREIRA, Micaela Benigna et al. Importância do Pó de Rocha para os Sistemas de Produção Agroecológica. **Cadernos de Agroecologia**. Volumes 1 (2006) a 12 (2017), v. 10, n. 3, 2015.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.). (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais — 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999.

RIBEIRO, F. J.; ALMEIDA, R. E. M.; FARIA, F. J. C. (2020). Rock powder as a remineralizer in maize cultivation: an alternative for sustainable agriculture. **Agricultural Sciences**, v. 11, n. 3, p. 123-131.

ROY, R.; BASU, A.; WANG, S.; MEI, G. Gaps and opportunities in acid soil management: Towards a more resilient cropping system. **Soil and Tillage Research**, v. 213, p. 105234, 2025.

SILVA, A. J.; COSTA, L. M. Remineralizadores de solo: potencial e desafios para a agricultura sustentável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. e0180153, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180153>.

SMITH, P.; KIM, H.; ARIAS, J.; MENDOZA, L. Assessing soil acidity and liming responses in highly weathered soils using advanced geostatistical tools. **Geoderma Regional**, v. 36, p. e00586, 2023.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2004.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Correção do Solo e Adubação** (2. ed.). Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2004.

STEINER, J. L.; SCHOMBERG, H. H.; UNGER, P. W.; CRESAP, J. **Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil**. CRC Press. 2017

WANG, Y.; SUN, D.; PARK, R. Long-term impact of surface-applied lime on acid soils: Implications for nutrient leaching and subsoil acidity. **European Journal of Soil Science**, v. 75, p. e13265, 2024.

ZHANG, Y.; SHI, J.; OUYANG, S.; CAI, X. Soil pH adjustments and aluminum bioavailability in managed acidic ecosystems: A global perspective. **Science of the Total Environment**, v. 724, p. 137941, 2020.