

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

MONICA CAROLINA SUSTAKOWSKI

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E TEORES DE NUTRIENTES EM GRÃOS DE
MILHO E SOJA APÓS APLICAÇÃO DE REMINERALIZADOR ASSOCIADO A
PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2025

MONICA CAROLINA SUSTAKOWSKI

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E TEORES DE NUTRIENTES EM GRÃOS DE
MILHO E SOJA APÓS APLICAÇÃO DE REMINERALIZADOR ASSOCIADO A
PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste
do Paraná, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do
título de Doctor Scientiae.

Orientadora: Dra. Edleusa Pereira Seidel
Coorientadora: Dra. Maria do Carmo Lana

Linha de pesquisa: Sistemas de Produção Vegetal
Sustentáveis

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Sustakowski, Monica Carolina

Atributos químicos do solo e teores de nutrientes em grãos de milho e soja após aplicação de remineralizador associado a plantas de cobertura e cama de frango / Monica Carolina Sustakowski; orientadora Edleusa Pereira Seidel; coorientadora Maria do Carmo Lana. -- Marechal Cândido Rondon, 2025.

112 p.

Tese (Doutorado Campus de Marechal Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2025.

1. Adubos verdes. 2. Fertilidade do solo. 3. Pó de rocha. 4. Rochagem. I. Seidel, Edleusa Pereira, orient. II. Lana, Maria do Carmo, coorient. III. Título.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46

Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>

Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000

Marechal Cândido Rondon - PR.



MONICA CAROLINA SUSTAKOWSKI

Atributos químicos do solo e teores de nutrientes em grãos de milho e soja após aplicação de remineralizador associado a plantas de cobertura e cama de frango

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Sistemas de Produção Vegetal Sustentáveis, APROVADA pela seguinte banca examinadora:

Orientadora - Edleusa Pereira Seidel

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Paulo Sérgio Rabello de Oliveira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Edmar Soares de Vasconcelos

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

Augusto Vaghetti Luchese

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)

Alfredo José Alves Neto

Agro Schimi Consultoria Agronômica e Pesquisa

Marechal Cândido Rondon, 11 de abril de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à Deus pelo dom da vida e por estar ao meu lado em todos os momentos, me dando força, saúde e ânimo para não desistir e continuar lutando por meus objetivos e ter tranquilizado meu espírito nos momentos mais difíceis desta trajetória.

Aos meus pais, Cleni e Sergio Sustakowski, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, que apesar de todas as dificuldades sempre me fortaleceram. Obrigada por sempre estarem ao meu lado me dando segurança e por todos os conselhos e ensinamentos que me ajudaram a chegar até esta etapa da minha vida. Vocês são exemplos de luta e superação e são a minha maior fonte de amor e força.

Ao meu grande amor, Willian dos Reis, que esteve comigo em cada etapa desta trajetória, compartilhando dias alegres e dias nublados. Meu companheiro de vida, de profissão, de pós-graduação, de coletas de solo, de capinas, de análises de laboratório, que esteve comigo em todos os momentos. Obrigada por ser meu lar, meu apoio, pela cumplicidade diária, por cada gesto de carinho, por sempre estar ao meu lado, por ser meu melhor amigo e por toda a segurança que me passa. Obrigada por acreditar em mim. Você é um presente que a vida me deu, é quem torna meus dias melhores, você é a luz em meus dias nublados. Te amo e te admiro profundamente!

Ao meu irmão, Carlos Fabrício Sustakowski, meu presente de Deus. Obrigada por todos os momentos que passamos juntos desde a infância, por ser meu amigo e por sempre me ouvir. Sua vida trouxe mais luz à minha vida. Agradeço também à minha cunhada, Camila Alves, por cada momento compartilhado e por cada lembrança construída.

Aos meus sogros, Sandra e José dos Reis, por terem me acolhido e serem minha segunda família. Obrigada por cada gentileza e por toda a atenção que sempre tiveram comigo. Agradeço por todo apoio que sempre deram aos meus objetivos e por torcerem e vibrarem com minhas conquistas.

Às minhas grandes amigas, Amanda, Claudinéia, Rayssa e Renata, pelos 10 anos de amizade (desde a graduação), que se manteve forte apesar dos anos e da distância. Obrigada por me acalmarem nos momentos de angústia e por me ajudarem a evoluir. Obrigada por todas as conversas, das mais aleatórias até as com mais profundo sentido, e por toda a compreensão nos momentos de ausência.

À minha querida orientadora Prof^a Dra. Edleusa Pereira Seidel, à quem sou muito grata por toda a paciência, atenção e dedicação em me orientar (desde a época de graduação) e, acima

de tudo, pelo incentivo que muitas vezes foi o impulso que precisava. Agradeço por todo o conhecimento transmitido e por toda ajuda sempre que precisei. Tenho orgulho de ser sua orientada e a tenho como um exemplo e inspiração de profissional.

À minha coorientadora, Prof^a Dra. Maria do Carmo Lana, por todas as contribuições feitas para a melhoria do trabalho e por disponibilizar o Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas para a realização das análises.

Ao Dr. Jucenei Fernando Frandoloso por todo auxílio durante a realização das análises químicas.

Aos integrantes do Grupo de Estudos em Solos e Agroecologia (GESA) e ao Centro Vocacional Tecnológico (CVT) por toda ajuda oferecida nas coletas de campo.

Aos funcionários do Núcleo de Estações Experimentais, especialmente ao Marcelo Lang, Ademir da Silva, Dirceu Rauber, Ernesto Deves e Claudio Adolino Kirsten que auxiliaram em toda a fase de experimento à campo. Agradeço pela paciência e dedicação sempre que precisei.

Ao Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Agronomia (PPGA) da UNIOESTE de Marechal Cândido Rondon, pela oportunidade de realização deste curso. Aos professores do PPGA que me deram recursos para evoluir todos os dias. Agradeço por todos os conhecimentos transmitidos que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

À secretária do PPGA da UNIOESTE, Leila Dirlene Allievi Werlang pelo comprometimento, paciência, atenção e auxílio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de auxílio ao estudo.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada.

RESUMO

SUSTAKOWSKI, Monica Carolina, D.S, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, abril-2025. **Atributos químicos do solo e teores de nutrientes em grãos de milho e soja após aplicação de remineralizador associado a plantas de cobertura e cama de frango.** Orientadora: Dra. Edleusa Pereira Seidel. Coorientadora: Dra. Maria do Carmo Lana.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a aplicação de remineralizador de solo associado a consórcios de plantas cobertura e cama de frango sobre os atributos químicos do solo, sobre os teores nutricionais em grãos de milho e soja e determinar quais tratamentos promoveram maior contribuição para a alteração do solo através da análise de componentes principais (ACP). O delineamento experimental foi de blocos casualizados em esquema de faixas subdivididas com dois fatores adicionais e quatro repetições. As faixas primárias foram três consórcios de plantas de cobertura: aveia-preta + nabo-forrageiro; tremoço branco + ervilha-forrageira; aveia + nabo + tremoço + ervilha. As faixas secundárias foram a presença e ausência de cama de frango (6 Mg ha^{-1}). As subfaixas foram a presença e ausência de remineralizador de solo (8 Mg ha^{-1}). Os fatores adicionais foram: testemunha absoluta e testemunha com adubação NPK. As características químicas do solo (pH, H+Al, V%, CTC, P, K, Ca e Mg) foram avaliadas aos 6, 12, 18 e 24 meses após o início do experimento nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Também foi realizada avaliação nutricional dos grãos de milho e de soja (P, K, Ca e Mg). A associação do remineralizador com a cama de frango e com os consórcios foi eficiente em melhorar e manter as condições químicas do solo em níveis adequados, além de reduzir o tempo necessário de reação do remineralizador; dentre os consórcios utilizados, aveia + nabo proporcionou maior efeito na associação com o remineralizador e com a cama de frango; a utilização do remineralizador, da cama de frango e do consórcio de aveia + nabo proporcionou valores de pH, H+Al, V%, CTC, P, K, Ca e Mg semelhantes aos verificados na testemunha com adubação NPK, demonstrando que o manejo da fertilidade do solo com essas fontes alternativas foi tão eficiente quanto a adubação química convencional. A utilização do remineralizador promoveu maiores teores de P e de Mg em grãos de milho e de Ca e de Mg em grãos de soja; a associação do remineralizador com a cama de frango ou com o consórcio de aveia + nabo resultou em maiores teores de P em grãos de soja; a associação do remineralizador com a cama de frango proporcionou maior teor de K em grão de soja. A análise de componentes principais indicou que entre os atributos químicos do solo avaliados, aqueles que melhor explicam a variabilidade dos tratamentos utilizados foram pH, H+Al, Ca, Mg, V% e P. O P esteve mais relacionado aos tratamentos que associaram o remineralizador com a cama de frango e com os consórcios. pH, Ca, Mg e V% apresentaram comportamento contrário ao verificado para o H+Al, sendo que a influência desses atributos não seguiu um padrão conforme o aumento do período de tempo de avaliação, variando também entre os diferentes tratamentos.

Palavras-chave: Adubos verdes. Fertilidade do solo. Pó de rocha. Rochagem.

ABSTRACT

SUSTAKOWSKI, Monica Carolina, D.S, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, april-2025. **Soil chemical attributes and nutrient contents in corn and soybean grains after application of remineralizer associated with cover crops and chicken litter.** Advisor: Dra. Edleusa Pereira Seidel. Co-Advisor: Dra. Maria do Carmo Lana.

The objective of this research was to evaluate the application of soil remineralizer associated with cover crop consortium and chicken litter on soil chemical properties, on the nutritional contents of corn and soybean grains and to determine which treatments promoted the greatest contribution to soil alteration through principal component analysis (PCA). The experimental design was randomized blocks in a split-strip scheme with two additional factors and four replicates. The primary strips were three cover crop consortium: black oat + forage turnip (mix 1); white lupine + forage pea (mix 2); oat + turnip + lupine + pea (mix 3). The secondary strips were the presence and absence of chicken litter (6 Mg ha⁻¹). The sub-strips were the presence and absence of soil remineralizer (8 Mg ha⁻¹). The additional factors were: absolute control and control with NPK fertilization. The chemical characteristics of the soil (pH, H+Al, P, K, Ca, Mg, V% and CEC) were evaluated at 6, 12, 18 and 24 months after the beginning of the experiment in the 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m layers. Nutritional evaluation of corn and soybean grains (P, K, Ca and Mg) was also performed. The association of the remineralizer with chicken litter and with the consortia was efficient in improving and maintaining the chemical conditions of the soil at adequate levels, in addition to reducing the time required for the remineralizer to react; among the consortia used, oats + turnip provided the greatest effect in the association with the remineralizer and chicken litter; the use of the remineralizer, chicken litter and the oat + turnip consortium provided pH, H+Al, V%, CEC, P, K, Ca and Mg values similar to those verified in the control with NPK fertilization, demonstrating that soil fertility management with these alternative sources was as efficient as conventional chemical fertilization. The use of the remineralizer promoted higher P and Mg contents in corn grains and Ca and Mg in soybeans; the association of the remineralizer with chicken litter or with the oat + turnip consortium resulted in higher P contents in soybeans; The association of the remineralizer with chicken litter provided a higher K content in soybean grain. The principal component analysis indicated that among the soil chemical attributes evaluated, those that best explained the variability of the treatments used were pH, H+Al, Ca, Mg, V% and P. P was more related to the treatments that associated the remineralizer with chicken litter and with the consortia. pH, Ca, Mg and V% presented behavior contrary to that observed for H+Al, and the influence of these attributes did not follow a pattern as the evaluation period increased, also varying among the different treatments.

Keywords: Green manures. Soil fertility. Rock powder. Stonemeal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação pluviométrica, temperaturas máximas, mínimas e médias mensais referentes ao período de março de 2021 a maio de 2023 no município de Entre Rios do Oeste, PR.....	12
Figura 2. Croqui do delineamento experimental utilizado	13
Figura 3. pH do solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.....	18
Figura 4. Teor de H^+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$) no solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.....	24
Figura 5. Saturação por bases (%) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.....	28
Figura 6. Capacidade de troca catiônica ($cmol_c\ dm^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.	32
Figura 7. Teor de fósforo ($mg\ dm^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.....	37
Figura 8. Teor de potássio ($cmol_c\ dm^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função da associação entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. ..	44
Figura 9. Teor de cálcio ($cmol_c\ dm^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.....	51
Figura 10. Teor de magnésio ($cmol_c\ dm^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação.....	58
Figura 11. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelos componentes principais (CPs) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método scree-plot para a camada de 0,00-0,10 m de acordo com o período de avaliação.	83
Figura 12. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelos componentes principais (CPs) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método scree-plot para a camada de 0,10-0,20 m de acordo com o período de avaliação.	84
Figura 13. Gráfico biplot dos componentes principais em função dos tratamentos associando remineralizador, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura e dos atributos químicos do solo na camada de 0,00-0,10 m aos 12 e 24 meses de avaliação.....	85
Figura 14. Gráfico biplot dos componentes principais em função dos tratamentos associando remineralizador, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura e dos atributos químicos do solo na camada de 0,10-0,20 m aos 12 e 24 meses de avaliação.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química inicial do solo da área experimental no município de Entre Rios do Oeste-PR, nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m.....	11
Tabela 2. Composição química do remineralizador utilizado proveniente de mineradora localizada no município de Palotina, PR.....	13
Tabela 3. Composição química da cama de frango proveniente de 8 a 10 lotes aplicada antes dos cultivos de inverno dos anos de 2021 e 2022.	14
Tabela 4. Classes de fertilidade do solo segundo o teor de P no solo, avaliado pelos métodos de Mehlich-1 e de Bray-1, e rendimento relativo de soja para cada classe.....	17
Tabela 5. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (pH em CaCl_2) para os tratamentos apresentados na figura 3.....	19
Tabela 6. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (H^+ +Al) para os tratamentos apresentados na figura 4.....	25
Tabela 7. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (saturação por bases) para os tratamentos apresentados na figura 5, de acordo com a camada de solo avaliada.....	29
Tabela 8. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (CTC) para os tratamentos apresentados na figura 6, de acordo com a camada de solo avaliada	33
Tabela 9. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de P) para os tratamentos apresentados na figura 7, de acordo com a camada de solo avaliada.....	38
Tabela 10. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de K) para os tratamentos apresentados na figura 8.....	45
Tabela 11. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de Ca) para os tratamentos apresentados na figura 9, de acordo com a camada de solo avaliada.....	52
Tabela 12. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de Mg) para os tratamentos apresentados na figura 10, de acordo com a camada de solo avaliada.....	59
Tabela 13. Teores médios de fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg) em grãos de milho cultivado na safra verão 21/22 em sucessão a consórcios de plantas de cobertura, aplicação de cama de frango e de remineralizador basáltico, bem como para as testemunhas.	67
Tabela 14. Teores médios de fósforo (g kg^{-1}) em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 em função das interações entre a cama de frango e o remineralizador, entre os consórcios de plantas de cobertura e o remineralizador e entre os consórcios e a cama de frango, e em relação às testemunhas.	71
Tabela 15. Teores médios de K (g kg^{-1}) em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 em função da interação entre a aplicação de cama de frango e de remineralizador, da sucessão a consórcios de plantas de cobertura e em relação às testemunhas.....	74
Tabela 16. Teores médios de cálcio e magnésio (g kg^{-1}) em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 em sucessão a consórcios de plantas de cobertura, cama de frango e remineralizador basáltico e em relação às testemunhas.	77
Tabela 17. Médias dos atributos químicos do solo que apresentaram maior influência na ACP na camada de 0,00-0,10 m aos 12 e 24 meses para 14 tratamentos.	87

Tabela 18. Médias dos atributos químicos do solo que apresentaram maior influência na ACP na camada de 0,10-0,20 m aos 12 e 24 meses para 14 tratamentos.	91
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 A DEPENDÊNCIA PELA IMPORTAÇÃO DE INSUMOS FERTILIZANTES E OS DESAFIOS PARA A ADOÇÃO DE UMA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL.....	2
2.2 REMINERALIZADORES DE SOLO COMO ALTERNATIVA DE FERTILIZAÇÃO ...	3
2.3 ALTERNATIVAS PARA O AUMENTO DA SOLUBILIZAÇÃO DOS REMINERALIZADORES DE SOLO	5
CAPÍTULO I: AÇÃO DE REMINERALIZADOR DE SOLO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	8
RESUMO.....	8
1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	11
2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	12
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS UTILIZADOS	13
2.3.1 Remineralizador	13
2.3.2 Cama de frango	14
2.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	15
2.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO.....	16
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	17
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1. ACIDEZ DO SOLO	17
3.6 SATURAÇÃO POR BASES (V%) E CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA (CTC)	27
3.2 TEOR DE FÓSFORO	36
3.3 TEOR DE POTÁSSIO	43
3.4 TEOR DE CÁLCIO	51
3.5 TEOR DE MAGNÉSIO	57
4 CONCLUSÕES.....	63
CAPÍTULO II: TEORES NUTRICIONAIS EM GRÃOS DE MILHO E DE SOJA CULTIVADOS APÓS APLICAÇÃO DE REMINERALIZADOR BASÁLTICO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO.....	64
RESUMO.....	64
1 INTRODUÇÃO	64
2 MATERIAL E MÉTODOS	66
2.1 ANÁLISE NUTRICIONAL DOS GRÃOS DE MILHO E DE SOJA	66
2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	66
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.1 MILHO	67
3.2 SOJA.....	71
4 CONCLUSÕES.....	78
CAPÍTULO III. AVALIAÇÃO DA QUÍMICA DO SOLO APÓS UTILIZAÇÃO DE REMINERALIZADOR, PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO POR MEIO DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	79
RESUMO.....	79
1 INTRODUÇÃO	79
2 MATERIAL E MÉTODOS	80

2.1 ANÁLISE DE COMPENENTES PRINCIPAIS	80
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4 CONCLUSÕES.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	109

1 INTRODUÇÃO GERAL

O clima tropical, predominante no Brasil, proporciona o rápido intemperismo das rochas e a lixiviação de nutrientes, resultando em solos pobres em fertilidade (GOLFETTO, 2016). Isso faz com que o manejo adequado da fertilidade do solo seja condição primordial para o sucesso da produção agrícola.

Para a safra 2023/2024 a área destinada para a produção de grãos no Brasil foi de 78 milhões de hectares, sendo que 84% foram ocupados pelas culturas da soja e do milho (CONAB, 2024). Nesse cenário, os cultivos de soja e de milho representam cerca de 70% do consumo de fertilizantes no Brasil (GLOBALFERT, 2023).

Entretanto, a demanda nacional de fertilizantes é suprida principalmente por insumos importados, uma vez que a produção nacional de fertilizantes é insuficiente. Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2024) no ano de 2023 a produção nacional de fertilizantes foi pouco mais de 6,9 milhões de toneladas de produto, ao passo que a importação ficou em torno de 39,4 milhões de toneladas de produto.

Atualmente, busca-se um sistema de produção mais sustentável, onde se minimiza a dependência de fertilizantes solúveis. Nesse contexto destaca-se a agricultura de base agroecológica. A grande dificuldade para adoção desse sistema é a disponibilidade de fertilizantes capazes de proporcionar bons rendimentos aos cultivos e, ao mesmo tempo, melhorias e manutenção da qualidade do solo e conservação dos recursos naturais (ARAÚJO, 2018).

A técnica da rochagem tem se difundido como um recurso de remineralização de solos a partir do uso de determinadas rochas moídas com o objetivo de rejuvenescer solos intemperizados e melhorar a sua fertilidade, a fim de se ter uma agricultura mais sustentável e independente da importação de insumos químicos (THEODORO et al., 2012).

Contudo, grande parte das rochas apresenta limitações quando utilizada como única estratégia de manejo da fertilidade do solo a curto prazo. Dessa forma, estudos vêm sendo realizados sobre a eficiência do uso de pós de rocha e de alternativas que aumentem a velocidade de solubilização dos minerais e facilite a disponibilidade dos nutrientes, mas muitas respostas ainda precisam ser validadas. Dentre elas, como as plantas de cobertura e a adubação orgânica podem aumentar a disponibilidade de nutrientes.

Desta forma, a hipótese adotada é de que a prática da rochagem reduz a necessidade de doses elevadas de fertilizantes convencionais com o passar do tempo, sendo possível substituir parte dessas fontes convencionais por fontes alternativas sem interferir negativamente

na aquisição de nutrientes pelas culturas e que quando associada a fatores biológicos do intemperismo a disponibilidade dos nutrientes é favorecida.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de remineralizador de solo associado com consórcios de plantas coberturas e com cama de frango sobre os atributos químicos do solo ao longo de 24 meses e sobre os teores de nutrientes nos grãos do milho e da soja.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A DEPENDÊNCIA PELA IMPORTAÇÃO DE INSUMOS FERTILIZANTES E OS DESAFIOS PARA A ADOÇÃO DE UMA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Em geral, os solos brasileiros são ácidos e pobres em virtude da ação do intemperismo, resultando em baixa disponibilidade de nutrientes, bem como grandes extensões de solos com baixa CTC e elevada acidez, o que torna necessário um alto investimento em corretivos e fertilizantes para que se consiga um bom desempenho agrícola (BERNARDI et al., 2002; PÁDUA, 2012).

De acordo com levantamentos do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2019) entre os anos de 2017 e 2019 os preços dos fertilizantes tiveram um aumento de quase 40%, sendo os maiores preços desde o ano de 2010. Segundo estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), por terem grande influência na produtividade, os fertilizantes podem representar até 30% dos custos de produção em alguns casos.

Como já mencionado, a demanda nacional de fertilizantes é suprida principalmente por insumos importados, uma vez que a produção nacional de fertilizantes é insuficiente. Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2024) no ano de 2023 a produção nacional de fertilizantes foi pouco mais de 6,9 milhões de toneladas de produto, uma queda de 8,8% em relação ao ano anterior, ao passo que a importação se situou em torno de 39,4 milhões de toneladas de produto, um aumento de 14%.

Além da dependência externa, o uso dos fertilizantes solúveis tem alguns problemas, tais como: possuem custos elevados associados ao beneficiamento e ao transporte a longas distâncias, estão propensos aos processos de lixiviação que pode ocasionar problemas ambientais (FERREIRA et al., 2009; MARTINS et al., 2010), necessitam de fontes não

renováveis de energia no seu processamento e dependem da utilização de recursos minerais não renováveis, escassos e mal distribuídos entre os países (FIXEN, 2009).

Aliado a esses fatores, as fontes convencionais de nutrientes apresentam algumas desvantagens em seu comportamento que é a lixiviação elevada em clima tropical relacionadas às elevadas temperaturas e precipitação pluviométrica, além das características do próprio solo. Outra limitação é a ausência de outros nutrientes minerais em sua composição, com várias culturas apresentando desequilíbrios nutricionais por esse motivo (FYFE et al., 2006).

Tal situação não apenas onera economicamente a produção agrícola, mas cria uma situação de vulnerabilidade para o país que, associada à dependência por insumos agrícolas, representam problemas de insegurança alimentar no Brasil (CARVALHO, 2013). Dessa forma, o desenvolvimento de novas técnicas à produção agrícola pode resultar em ganho de competitividade, além da diminuição dos custos de produção, aumento da produtividade e da lucratividade (LAVORATO; BRAGA, 2017).

Além disso, essas questões fragilizam o posicionamento do Brasil em relação à sustentabilidade de seu sistema de produção, gerando um desafio na busca de soluções alternativas nesse setor, visto que a utilização de fertilizantes no Brasil não tem sido feita de forma racional, geralmente com uso excessivo de alguns e falta em outros nutrientes (MARTINS et al., 2010).

Outra dificuldade para o estabelecimento e adoção de uma agricultura sustentável é a disponibilidade de insumos que se enquadrem nas especificidades desse sistema de produção, dentre eles, fertilizantes capazes de proporcionar bons rendimentos aos cultivos e, ao mesmo tempo, melhorias e manutenção da qualidade do solo (ARAÚJO, 2018).

Dessa forma, a reciclagem de resíduos, seja de origem agrícola ou industrial, cujos descartes indevidos podem causar impactos negativos ao meio ambiente, surge como uma importante ferramenta para minimizar a baixa oferta de fertilizantes para os sistemas sustentáveis de produção.

2.2 REMINERALIZADORES DE SOLO COMO ALTERNATIVA DE FERTILIZAÇÃO

Uma alternativa sustentável para a reposição de nutrientes ao solo é o uso de pós de rochas moídas, técnica denominada como rochagem, em que se utiliza o produto oriundo do beneficiamento de materiais minerais que apresentam solubilidade mais lenta, disponibilizando os nutrientes para as plantas por um período maior do que os fertilizantes convencionais (MARTINS et al., 2015; TAVARES et al., 2018).

O termo “rochagem” surgiu por analogia aos termos calagem, fosfatagem, gessagem e, apesar de calcários e rochas fosfóricas serem rochas e também serem aplicados *in natura* na agricultura, o termo rochagem é mais empregado quando se trata da utilização de rochas silicatadas moídas (CARVALHO, 2013).

A rochagem também é considerada como um tipo de remineralização, utilizada para rejuvenescer solos pobres quimicamente ou lixiviados, formando novas fases minerais de elevada CTC no solo devido à presença de silicatos que possibilitam a adsorção de cátions como K, Ca e Mg, impedindo que eles sejam sujeitos a processos de perdas.

No Brasil para que um material possa ser comercializado como remineralizador deve estar enquadrado na Lei Federal nº 12.890 (BRASIL, 2013) e sua comercialização e registro está fundamentada na Instrução Normativa MAPA nº 05, a qual estipula as garantias mínimas da concentração de nutrientes no remineralizador, além das características necessárias para que haja eficiência em sua utilização (BRASIL, 2016).

Apesar da pesquisa ser recente, o uso de rochas silicatadas como fonte de nutrientes na agricultura é uma prática antiga, mas que acabou sendo esquecida com o advento dos fertilizantes solúveis. No Brasil, a revalorização dessa prática está ligada a três aspectos principais: I) busca por alternativas às fontes de nutrientes importadas; II) necessidade de aproveitamento de grandes quantidades de rejeitos de pedreiras e mineradoras e; III) expansão das correntes de agricultura de base agroecológica, com restrições ao uso de fertilizantes solúveis e estímulos à utilização de recursos localmente disponíveis (COLA; SIMÃO, 2012; CARVALHO, 2013). CAMARA et al., 2021

Comumente são utilizadas rochas silicáticas, as quais são compostas por uma alta gama de minerais como flogopita, feldspatos, biotitas, minerais máficos (RIBEIRO et al., 2010; SILVA et al., 2012). Os nutrientes comumente fornecidos são o fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alguns micronutrientes, além de elementos benéficos às plantas como o silício (Si) (MELO et al., 2009; VAN STRAATEN, 2006).

Uma característica importante dos remineralizadores utilizados é quanto a sua solubilidade mais lenta que permite um efeito residual após a aplicação, racionalizando o uso dos nutrientes pelas plantas, o que pode contribuir para a redução da demanda por aplicação de fertilizantes solúveis por determinados períodos ou reduzir a necessidade por doses elevadas pelo aumento sustentável da fertilidade do solo (HARLEY; GILKES, 2000).

Dessa forma, a remineralização do solo compreende uma grande vantagem para a agricultura tropical, pois a liberação lenta e gradual de nutrientes, além de ser positiva em função dos efeitos residuais sobre cultivos sucessivos, também é importante em função da

136 formação de minerais secundários com elevada CTC, apresentando também um papel de
137 condicionador do solo (MARTINS et al., 2010).

138 Hanisch et al. (2013) buscando avaliar o efeito de doses de remineralizador basáltico,
139 combinadas com a presença ou ausência de fertilização, sobre alguns atributos químicos do
140 solo, verificaram que houve aumento dos teores de P, Mg, Zn, Cu e Fe no solo com o aumento
141 das doses do remineralizador aos 14 meses após sua aplicação ao solo.

142 Batista et al. (2017) ao avaliar o efeito de doses de basalto moído (0; 0,96; 1,92; 3,84;
143 5,76 e 7,68 Mg ha⁻¹) sobre os atributos químicos do solo cultivado com soja em sucessão a
144 sorgo, observaram redução na acidez do solo com o aumento das doses, além de proporcionar
145 aumento nos teores de Ca, P e Si.

146 Contudo, grande parte das rochas apresenta limitações quando utilizada como única
147 estratégia de manejo da fertilidade do solo, pois, a diversidade mineralógica e granulométrica
148 acaba interferindo na velocidade de liberação dos nutrientes, o que pode acabar favorecendo a
149 liberação de alguns nutrientes em detrimento de outros (CARVALHO, 2012).

150 Isso faz com que essas fontes sejam menos responsivas em curto prazo, quando
151 comparadas aos fertilizantes de alta solubilidade (CARVALHO, 2013), o que ocorre devido
152 aos elementos estarem dentro das estruturas cristalinas dos minerais das rochas (HARLEY;
153 GILKES, 2000). Isso torna necessário que o emprego de remineralizadores de solo seja
154 associado a alternativas que sejam capazes de interagir com os minerais e acelerar o processo
155 de solubilização e disponibilidade dos nutrientes.

157 2.3 ALTERNATIVAS PARA O AUMENTO DA SOLUBILIZAÇÃO DOS 158 REMINERALIZADORES DE SOLO

160 Alguns trabalhos verificaram que as plantas possuem estratégias de acessar os
161 elementos retidos nas estruturas dos minerais, atuando de forma a acelerar o intemperismo dos
162 minerais e facilitar a sua disponibilização para a cultura subsequente (HINSINGER et al., 2001;
163 WANG et al., 2011).

164 O efeito solubilizador das plantas ocorre porque elas possuem a capacidade de
165 modificar as condições químicas da rizosfera a partir da liberação de íons H⁺ ou OH⁻, resultantes
166 da respiração e da absorção de íons; ou pela liberação de exsudatos e ácidos orgânicos de baixo
167 peso molecular no solo (oxalatos, citratos, malatos) que desencadeiam processos que facilitam
168 a dissolução dos minerais (MANNING et al., 2017).

Esses ácidos orgânicos liberados pelas plantas reagem com a superfície dos minerais e podem complexar fortemente o Al^{3+} da sua estrutura ou formar quelatos com cátions em solução, forçando a instabilidade do mineral pelo aumento do gradiente de concentração (LANDEWEERTET et al., 2001).

Os ácidos orgânicos liberados pelas plantas promovem diferença de pH na rizosfera que pode chegar a duas unidades de pH em relação ao solo não rizosférico, sendo que uma única raiz pode tanto aumentar como reduzir o pH da rizosfera, podendo incrementar a dissolução de compostos que tenham maior solubilidade em alto ou baixo pH (NEUMANN; ROMHELD, 2012).

Dessa forma, as reações com os ácidos orgânicos e a alteração da acidez na região da rizosfera podem desencadear lentamente o processo de dissolução dos minerais. Esse processo, embora seja lento, ocorre de forma contínua durante o ciclo de desenvolvimento das plantas, podendo ocorrer reações semelhantes ao intemperismo químico desses minerais (ROCHA NETO, 2020).

Carvalho (2012) observou que as plantas são capazes de atuar sobre a disponibilização de elementos das rochas, ao passo que o solo de forma isolada demonstrou uma capacidade inferior de disponibilizar os nutrientes das rochas. O autor verificou que na presença de plantas de cobertura a disponibilização de nutrientes apresentou incremento de 401% para o Si, 98% para o P, 17% para o Mg e 16% para o K.

Tais informações incentivam a recomendação da aplicação antecipada dos remineralizadores juntamente com o uso de plantas de cobertura, visto que algumas espécies de plantas possuem capacidade de disponibilizar nutrientes presentes em rochas. Dessa forma, torna-se importante a realização de estudos que permitam conhecer e compreender melhor quais plantas têm maior potencial de acessar os nutrientes e assim conciliar o uso dessas práticas.

Os microrganismos também apresentam capacidade de promover o intemperismo de minerais silicatados, tanto pela simples fragmentação de partículas como por alterações químicas na superfície dos minerais. Além disso, os microrganismos podem alterar o ambiente ao seu redor, promovendo modificações no potencial eletroquímico e na concentração de ácidos orgânicos que desencadeiam processos ligados ao intemperismo químico (HARLEY; GILKES, 2000).

Dessa forma, além da utilização de plantas de cobertura como meio para acelerar a solubilização das partículas dos remineralizadores, tem-se buscado também estratégias para incrementar e potencializar a atividade microbiológica do solo por meio da adição de adubos orgânicos (SILVA et al., 2008; CAMARGO et al., 2012; LIVI; CASTAMANN, 2016),

contudo, ainda são poucos os estudos avaliando o efeito de adubos orgânicos adicionados juntamente a remineralizadores de solo.

Dentre as fontes orgânicas de nutrientes disponíveis, as mais comuns são oriundas dos resíduos de origem animal, com destaque para o esterco gerado pela avicultura. A avicultura tem grande importância e está presente em grande escala na região Sul do Brasil, principalmente na região Oeste do estado do Paraná, sendo uma atividade com alto potencial de crescimento ao longo dos anos, gerando uma grande quantidade de resíduos orgânicos que podem ocasionar danos ao meio ambiente se utilizados sem os devidos cuidados (CURTIS et al., 2023), mas com a utilização correta tornam-se excelentes estratégias para o manejo da fertilidade do solo e para o aprimoramento da utilização de remineralizadores de solo.

O resíduo mais importante dessa atividade é a cama de frango, que é utilizada com o objetivo de impedir o contato direto das aves com o piso dos aviários, promover a absorção de água e evitar oscilações de temperatura no interior do aviário. O material final constitui em uma mistura de excrementos das aves, penas, fragmentos de material sólido e orgânico utilizados nos pisos dos aviários, juntamente com a ração desperdiçada (GARCIA et al., 2013).

Considerando o fortalecimento de sistemas de produção mais sustentáveis, os aportes de remineralizadores poderiam ser melhorados por meio de processos biológicos que garantiriam a contínua reciclagem dos nutrientes minerais a partir de formas orgânicas. Com base nisso, torna-se válido as pesquisas associando a remineralização, adubos orgânicos de origem animal e o cultivo de plantas de cobertura.

CAPÍTULO I: AÇÃO DE REMINERALIZADOR DE SOLO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de remineralizador de solo associado com três consórcios de plantas de cobertura e com cama de frango sobre a acidez e os teores de P, K, Ca e Mg no solo ao longo de 24 meses de avaliação. O delineamento experimental foi de blocos casualizados em esquema de faixas subdivididas com dois fatores adicionais e quatro repetições. As faixas primárias foram três consórcios de plantas de cobertura: aveia-preta + nabo-forrageiro; tremoço branco + ervilha-forrageira; aveia + nabo + tremoço + ervilha. As faixas secundárias foram a presença e ausência de cama de frango (6 Mg ha^{-1}). As subfaixas foram a presença e ausência de remineralizador de solo (8 Mg ha^{-1}). Os fatores adicionais foram: testemunha absoluta e testemunha com adubação NPK. Foram avaliados o pH, H^+Al , V%, CTC, P, K, Ca e Mg aos 6, 12, 18 e 24 meses após o início do experimento. A amostragem foi realizada com uso de uma pá de corte, coletando-se três subamostras por parcela, as quais constituíram uma amostra composta por parcela, nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m. A associação do remineralizador com a cama de frango e com os consórcios foi eficiente em melhorar e manter as condições químicas do solo em níveis adequados, além de reduzir o tempo necessário de reação do remineralizador; dentre os consórcios utilizados, aveia + nabo proporcionou maior efeito na associação com o remineralizador e com a cama de frango; a utilização do remineralizador, da cama de frango e do consórcio de aveia + nabo proporcionou valores de pH, H^+Al , V%, CTC, P, K, Ca e Mg semelhantes aos verificados na testemunha com adubação NPK, demonstrando que o manejo da fertilidade do solo com essas fontes alternativas foi tão eficiente quanto a adubação química convencional.

1 INTRODUÇÃO

Apesar do Brasil ser um país megadiverso com a superfície recoberta por rochas, os solos, em geral, apresentam índices de fertilidade muito baixos. Este fato decorre de uma série de fatores, entre os quais se destacam: (i) a localização de grandes porções do país em áreas de clima tropical (onde os solos são intensamente lixiviados); (ii) formações geológicas de rochas quartzosas ou aluminosas de origem sedimentar e (iii) solos antigos em regiões de estabilidade tectônica. Assim, o tempo de exposição à ação físico-química-biológica acaba por produzir solos quimicamente empobrecidos e com baixos níveis de fertilidade (THEODORO; LEONARDOS; ALMEIDA, 2010).

Constituindo-se como macronutriente, o fósforo (P) é elemento crucial no metabolismo das plantas, contudo, é também o elemento com maior restrição em solos tropicais. A elevada capacidade de adsorção às partículas de argila do solo, principalmente aos óxidos de

ferro e alumínio tornam o P um dos elementos com menor taxa de aproveitamento na agricultura (FINK et al., 2016).

Vários fatores podem alterar a dinâmica do P no solo, como as próprias condições de reação do solo, uma vez que com o aumento do pH a solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio aumenta e reduz a adsorção do ânion fosfato à fase sólida do solo (SANDIM et al., 2014), outros fatores que afetam sua dinâmica no solo é o manejo do solo, as remoções deste nutriente pelas plantas e as aplicações de fertilizantes fosfatados (TOKURA et al., 2011).

Também existem evidências do efeito do silício na dinâmica do fósforo no solo, desta forma, é esperado que a aplicação de materiais contendo Si em sua composição pode aumentar a disponibilidade de P no solo. Na literatura científica estuda-se a utilização de rochas silicatadas como fontes de nutrientes, prática denominada como rochagem (HANISH et al., 2013; BUSATO et al., 2022; MEDEIROS et al., 2024).

Dentre os macronutrientes, o potássio (K) é o segundo requerido em maior quantidade pelas plantas, sendo que no solo pode ser encontrado em quatro formas: i. na solução do solo; ii. na forma trocável, retido nas cargas elétricas do solo; iii. na forma não trocável, disposto nas entre camadas de alguns argilominerais do tipo 2:1 (pouco comum nos solos tropicais); iv. na forma estrutural, presente na rede cristalina de minerais primários (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

Contudo, apenas uma pequena porção do K do solo está em solução ou em formas trocáveis que podem ser facilmente utilizadas pelas plantas. A maior parte do K está retido em minerais em formas não trocáveis ou estruturais que são lentamente ou menos disponíveis para as plantas (WANG et al., 2011).

Entretanto, a maioria dos solos brasileiros apresenta baixos teores de minerais primários (biotita, muscovita e ortoclásio) e secundários (vermiculita, ilita e esmectita) mais ricos em K, com predomínio de minerais pobres nesse elemento como a caulinita e os óxidos de Fe e de Al (BATISTA et al., 2018). Como o K^+ tem menor força de atração às cargas negativas do solo em comparação a outros cátions de maior valência (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}), seu comportamento depende da CTC do solo, sendo mais facilmente lixiviado em solos de baixa CTC (WIHARDJAKA et al., 2022). Esses fatores fazem com que a fração de K prontamente disponível às plantas esteja intimamente relacionada às adubações.

No solo o cálcio (Ca) tem grande importância na estabilização da matéria orgânica e dos agregados, pela formação de complexos com a argila e a matéria orgânica pela ponte catiônica (SÁ et al., 2024), promove o crescimento das raízes, aumento da atividade microbiana, diminui a toxidez do alumínio, cobre e manganês (PRIETZEL et al., 2021).

A disponibilização de Ca para a solução do solo pode ocorrer por três fontes: minerais que contém Ca (calcita, plagioclásio, colemanita), do conteúdo de Ca complexado na matéria orgânica do solo e pelo Ca retido na forma de cátion trocável nos coloides do solo (SARTO et al., 2019).

O magnésio (Mg) é o oitavo mineral mais abundante na crosta terrestre e no solo origina-se do intemperismo de rochas contendo minerais primários como dolomita e silicatos com Mg (olivina, serpentina e biotita) ou em minerais secundários como clorita, ilita, montmorilonita e vermiculita (KÄMPF et al., 2009).

Entretanto, a reposição de Mg ao solo é frequentemente negligenciada e sua falta afeta negativamente o desenvolvimento das plantas. As deficiências de magnésio estão associadas a solos ácidos e/ou a situações que provocam desequilíbrio, como excesso de adubação potássica (IMAIZUMI et al., 2018).

Em relação aos fertilizantes solúveis, a rochagem apresenta grandes vantagens para a agricultura tropical, como: efeito residual prolongado; não acidifica o solo e pode corrigir a acidez; não saliniza o solo; reduz a fixação do P solúvel pela presença de sílica; a matéria prima é inteiramente nacional, fácil de ser extraída e encontram-se distribuídas em todas as regiões do país; formação de minerais secundários que agem na elevação da CTC do solo e consequentemente reduz as perdas dos nutrientes por lixiviação na solução do solo (AMPARO, 2003; MARTINS et al., 2010).

Contudo, a dissolução dos remineralizadores é um processo lento que depende de vários fatores como a composição química e mineralógica da rocha, a granulometria do material, o tempo de reação, assim como fatores do próprio solo como o pH e a presença de microrganismos atuando no intemperismo (OSTERROHT, 2003).

A ação das plantas e dos microrganismos sobre o intemperismo dos minerais pode ir da simples fragmentação das partículas a alterações químicas na superfície dos minerais (HINSINGER et al., 2001). Nesse contexto, vários processos biogeoquímicos podem estar envolvidos, como o aumento da pressão parcial de CO₂ no solo pela respiração vegetal e microbiana, a liberação de ácidos orgânicos ou o deslocamento dos equilíbrios de dissolução pela remoção de cátions da solução do solo pelas plantas e pela microbiota (HARLEY; GILKES, 2000).

Nesse sentido, é possível estimular esses processos através da adição conjunta dos remineralizadores com adubações orgânicas, pela seleção de plantas para adubação verde e/ou cobertura do solo com maior colonização micorrízica ou com maior produção de ácidos orgânicos (CARVALHO, 2012).

Diante disso, a hipótese adotada é de que a prática da rochagem reduz a necessidade de doses elevadas de fertilizantes convencionais com o passar do tempo, sendo possível substituir parte dessas fontes convencionais por fontes alternativas, mantendo os teores de P, K, Ca e Mg adequados e que quando aliada a fatores biológicos do intemperismo a disponibilidade desses nutrientes é favorecida.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de remineralizador de solo associado com três consórcios de plantas de cobertura e com cama de frango sobre a acidez e os teores de P, K, Ca e Mg no solo ao longo de 24 meses de avaliação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido durante o período de março de 2021 a maio de 2023 na Estação Experimental Professor Alcibiades Luiz Orlando, localizada no município de Entre Rios do Oeste, nas coordenadas geográficas de latitude 24°40'34"S, longitude 54°16'45"O e altitude de 242 m em relação ao nível do mar, pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon – PR.

O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico típico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

Antes da implantação do experimento foi realizada a caracterização granulométrica do solo de acordo com metodologia proposta por Donagemma et al. (2017). O solo apresentou os valores de 734,5 g kg⁻¹ de argila, 176,74 g kg⁻¹ de silte e 88,76 g kg⁻¹ de areia, portanto, uma textura muito argilosa.

A caracterização química inicial do solo na área experimental foi realizada por meio da coleta aleatória, com uso de uma pá de corte, de quinze amostras simples, resultando em uma amostra composta. A amostragem foi realizada nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química inicial do solo da área experimental no município de Entre Rios do Oeste-PR, nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m.

Camada	M.O. g dm ⁻³	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H + Al cmol _c dm ⁻³	Al	CTC	V%
0,00 – 0,10 m	25,53	4,88	15,59	0,51	4,23	1,40	5,11	0,05	11,25	54,58
0,10 – 0,20 m	22,53	4,85	20,85	0,40	4,31	1,40	5,24	0,09	11,35	53,83

M.O.: matéria orgânica; V%: saturação por bases.

O clima da região é classificado como Cfa, subtropical úmido mesotérmico, de acordo com a classificação climática de Köppen, com verões quentes com tendência de concentração das chuvas (temperatura média superior a 22°C), invernos com geadas pouco frequentes (temperatura média inferior a 18°C) e precipitação média anual em torno de 1.600 a 1.800 mm (NITSCHKE et al., 2019). Os dados pluviométricos e de temperatura para os meses em que o experimento foi conduzido (março de 2021 a maio de 2023) juntamente com a indicação da realização das etapas do experimento são apresentados na Figura 1.

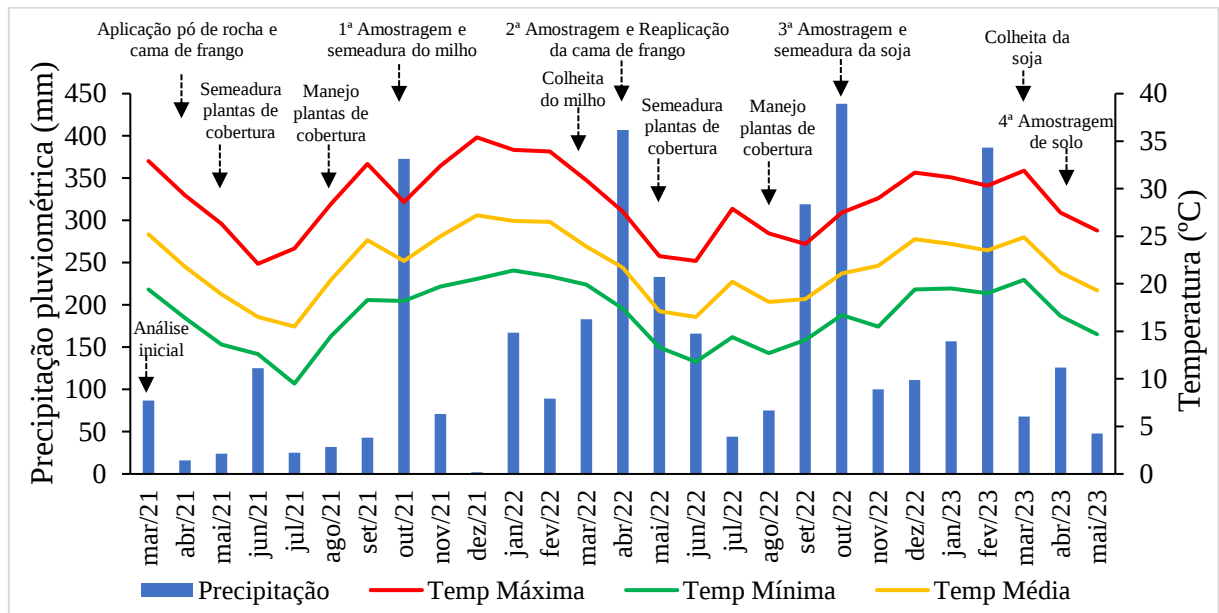


Figura 1. Precipitação pluviométrica, temperaturas máximas, mínimas e médias mensais referentes ao período de março de 2021 a maio de 2023 no município de Entre Rios do Oeste, PR.

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em esquema de faixas subdivididas com dois fatores adicionais e quatro repetições. As faixas primárias foram constituídas por três consórcios de plantas de cobertura: aveia-preta + nabo-forrageiro (mix 1); tremço branco + ervilha-forrageira (mix 2); aveia-preta + nabo-forrageiro + tremço branco + ervilha-forrageira (mix 3). As faixas secundárias foram compostas pela presença e ausência de cama de frango da dose de 6 Mg ha⁻¹. Já as subfaixas foram constituídas pela presença ou ausência de remineralizador basáltico na dose de 8 Mg ha⁻¹.

O experimento teve dois fatores adicionais: uma testemunha absoluta e uma testemunha com adubação química de um formulado NPK nas culturas do milho e da soja.

A área experimental foi constituída por doze faixas primárias (5x32 m), oito faixas secundárias (5x16 m) e estas divididas em seis subfaixas (5x8 m), além de duas testemunhas adicionais com quatro repetições cada, totalizando 56 unidades experimentais e uma área de 2.240 m² (Figura 2).

Com cama de frango		Com remineralizador: X									
Sem cama de frango		Sem remineralizador: 0									
BLOCO 1	MIX 1	X	0	X	0	BLOCO 3	MIX 3	X	0	0	X
	MIX 2	0	X	0	X		MIX 1	X	0	X	0
	MIX 3	X	0	0	X		MIX 2	0	X	X	0
BLOCO 2	MIX 2	0	X	0	X	BLOCO 4	MIX 3	X	0	X	0
	MIX 1	0	X	X	0		MIX 2	0	X	X	0
	MIX 3	X	0	X	0		MIX 1	X	0	0	X
Test 1						Test 2					
Testemunha absoluta						Testemunha adubação NPK					

Figura 2. Croqui do delineamento experimental utilizado. Mix 1: consórcio de aveia-preta + nabo-forrageiro; Mix 2: consórcio de tremoço branco + ervilha-forrageira; Mix 3: consórcio de aveia-preta + nabo-forrageiro + tremoço branco + ervilha-forrageira.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS UTILIZADOS

2.3.1 Remineralizador

O remineralizador utilizado era de origem basáltica e foi proveniente de mineradora localizada no município de Palotina-PR. A composição química foi determinada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná (UFPR, Curitiba-PR) utilizando metodologia de espectrometria de fluorescência de raios X (Tabela 2).

O material está de acordo com as especificações exigidas pela Instrução Normativa MAPA nº 05 (Brasil, 2016) para ser passível de ser utilizado como um remineralizador na agricultura. As normas estabelecidas são: soma de bases (CaO, MgO, K₂O) igual ou superior a 9% e teor de K₂O igual ou superior a 1%.

Tabela 2. Composição química do remineralizador utilizado proveniente de mineradora localizada no município de Palotina, PR.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	P.F.	Soma
%											
51,39	13,30	14,91	8,77	4,40	1,18	2,73	2,01	0,22	0,27	0,90	100,09

P.F.: Perda ao fogo.

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, embora as amostras possuam consideráveis teores de óxido de alumínio, este elemento não é biodisponibilizado para a solução do solo devido ao processo incongruente de intemperismo (KRAHL et al., 2022). Esse fato é extremamente positivo devido ao alumínio ser tóxico para as plantas.

A granulometria do pó de basalto foi determinada por peneiramento. Para tanto, foi utilizado um conjunto de peneiras com abertura de 2,00 (ABNT 10), 0,84 (ABNT 20) e 0,30 mm (ABNT 50) de malha. O material apresentou 100% das partículas menores que 2,00 mm; 81,13% menores que 0,84 mm e 51% menores que 0,30%. De acordo com a Instrução Normativa nº 05, para que um produto possa ser comercializado como remineralizador este deve apresentar garantia granulométrica de pelo menos 50% das partículas menores do que 0,3 mm, 70% menores que 0,84 mm e 100% menores que 2,0 mm. Portanto, verifica-se que o material utilizado está de acordo com as exigências estabelecidas.

2.3.2 Cama de frango

A cama de frango foi escolhida como material orgânico para utilização em associação ao remineralizador de solo pelo seu potencial como fonte de nutrientes e por ser um material rico em microrganismos; bem como, pela sua grande abundância na região o que facilita a aquisição.

A cama de frango foi adquirida através da compra direta com o produtor, sendo a mesma proveniente após o uso de 8 a 10 lotes de frango. O resíduo foi utilizado na forma sólida, na dose de 6 Mg ha⁻¹, corrigida para o teor de umidade do material.

Para a caracterização química do material foi realizada a coleta de amostras do resíduo e encaminhadas para análise. Os resultados da análise química estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química da cama de frango proveniente de 8 a 10 lotes aplicada antes dos cultivos de inverno dos anos de 2021 e 2022.

Cultivo 2021								
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	pH	umidade	C.O.
g kg ⁻¹							%	
30,45	22,80	14,92	46,49	9,40	12,72	8,11	15,51	18,51
Cultivo 2022								
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	pH	Umidade	C.O.
g kg ⁻¹							%	
24,78	42,45	26,80	110,00	57,00	14,46	7,6	26	20,52

C.O.: Carbono orgânico

2.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Após ser realizada a caracterização química do solo e a dessecação química da área com 1.800 g ha⁻¹ do equivalente ácido glifosato foi realizada a aplicação da cama de frango e do remineralizador de forma manual em área total de cada unidade experimental, aplicando os insumos em superfície e sem incorporação (Anexo A).

Posteriormente foi realizada a implantação das plantas de cobertura em semeadura direta. Para a semeadura do mix 1 foi utilizada densidade de 70 kg ha⁻¹ de sementes de aveia-preta e 4 kg ha⁻¹ de sementes de nabo-forrageiro; o mix 2 foi implantado com densidade de 80 kg ha⁻¹ de sementes de tremoço branco e 60 kg ha⁻¹ de sementes de ervilha-forrageira; e o mix 3 com as densidades de sementes de 35 kg ha⁻¹ de aveia-preta, 1 kg ha⁻¹ de nabo-forrageiro, 20 kg ha⁻¹ de tremoço branco e 15 kg ha⁻¹ de ervilha-forrageira (Anexo B).

As testemunhas não foram cultivadas com culturas de inverno e para a manutenção dessas áreas, quando necessário, foi realizado o controle mecânico das plantas voluntárias (Anexo C). No tratamento que recebeu adubação química com NPK esta foi realizada na semeadura na cultura de verão. A dose foi definida de acordo com a análise química do solo e com as exigências de cada cultura, seguindo a recomendação estabelecida pelo Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2019).

Quando as plantas de cobertura atingiram o estágio de florescimento foram manejadas com uso de rolo faca (Anexo D) e posteriormente foi realizada a amostragem de solo para determinação das características químicas, que correspondeu ao período de 6 meses de avaliação.

Posteriormente foi implantada a cultura do milho safra de verão 2021/2022 utilizando o Híbrido Pioneer P4285VYHR Leptra sob semeadura direta, com espaçamento entre linhas de 0,70 m, utilizando densidade de 60.000 sementes ha⁻¹ (4,2 sementes m⁻¹). Não foi realizada adubação química na semeadura (exceto na testemunha com adubação). Foi realizada aplicação de N em cobertura em todos os tratamentos, visto que o remineralizador não fornece esse nutriente, na dose de 300 kg ha⁻¹ de ureia (46% de N). Nas parcelas referentes às testemunhas com adubação foi utilizado 250 kg ha⁻¹ do formulado 12-24-12 (N-P₂O₅-K₂O). Os tratamentos fitossanitários foram realizados conforme a necessidade da cultura. Após a colheita foi realizada a amostragem de solo que correspondeu ao período de 12 meses de avaliação.

Para o inverno de 2022 foi realizado o cultivo com os mesmos consórcios de plantas de cobertura cultivados no período anterior e novamente houve a aplicação de cama de frango, contudo, não foi realizada a reaplicação do remineralizador a fim de avaliar o seu efeito residual.

Após o manejo das plantas de cobertura foi realizada a amostragem para determinação das propriedades químicas do solo, correspondendo ao período de 18 meses de avaliação.

Para a safra de verão 2022/2023 foi realizado o cultivo com a cultura da soja, utilizando a Cultivar M5947IPRO sob semeadura direta, com espaçamento entre linhas de 0,50 m, utilizando densidade de semeadura de 15 sementes por metro linear, totalizando 300.000 sementes ha⁻¹. Assim como na cultura do milho, foi realizada adubação química na semeadura apenas para a testemunha com adubação, utilizando 250 kg ha⁻¹ do formulado químico 02-20-18 (N-P₂O₅-K₂O). Os tratos fitossanitários foram realizados conforme a necessidade da cultura. Após a colheita foi realizada a amostragem de solo para a análise que correspondeu ao período de 24 meses de avaliação.

2.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

As características químicas do solo foram determinadas em quatro épocas diferentes: posteriormente ao manejo das plantas de cobertura (inverno de 2021 e 2022) e após a colheita das culturas do milho (safra 2021/2022) e da soja (safra 2022/2023).

A amostragem foi realizada com uso de uma pá de corte, coletando-se três subamostras por parcela, as quais constituíram uma amostra composta por parcela. A coleta foi estratificada em quatro camadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m). Contudo, como não houve variações significativas da química do solo entre as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m e entre as camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, para a análise estatística foi utilizada a média obtida entre as camadas, resultando em duas camadas: 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m.

As variáveis químicas determinadas foram: acidez ativa (pH em solução de CaCl₂), acidez potencial (H⁺+Al³⁺), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) seguindo metodologia proposta por Lana et al. (2016). Com os dados obtidos foi calculado a saturação por bases (V%) e a capacidade de troca catiônica (CTC).

Embora o método mais empregado para a determinação de P no solo seja o Mehlich-1, ele não foi utilizado no presente trabalho em virtude da aplicação do remineralizador. A elevada acidez do Mehlich-1 pode solubilizar grande parte do P não disponível presente nos minerais da rocha e superestimar o teor de P disponível, como já foi verificado na literatura (RAIJ, 1991; BRASIL; MURAOKA, 1997; NOVAIS; SMYTH, 1999; CORRÊA et al., 2008).

O teor de fósforo (P) no solo foi determinado pelo método de extração com soluções diluídas de ácidos fortes adicionada com íon complexante (Bray-1), cuja mistura utilizada foi de HCl e NH₄F. O íon fluoreto forma um forte complexo com íons Al³⁺ (KAMPRATH;

WATSON, 1980), liberando assim o P ligado ao metal. O P presente no solo como fosfato de cálcio também é extraído, com a precipitação de fluoreto de cálcio. As concentrações utilizadas foram de 0,025 N para o HCl e de 0,03 N para o NH_4F (BRAY; KURTZ, 1945).

Para a classificação dos teores de P extraídos do solo pelo método de extração Bray-1 foi utilizada a classificação proposta pela Embrapa a partir de estudos realizados durante os anos de 1980 e 1981 em Latossolo Vermelho com textura argilosa (700 g kg^{-1} de argila) que é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Classes de fertilidade do solo segundo o teor de P no solo, avaliado pelos métodos de Mehlich-1 e de Bray-1, e rendimento relativo de soja para cada classe.

Classe de fertilidade	Teor de P extraído (mg dm^{-3})		Rendimento relativo (%)
	Mehlich-1	Bray-1	
Extremamente baixa	< 1,0	< 2,0	< 25
Muito baixa	1,1 – 3,0	2,1 – 4,0	26 – 50
Baixa	3,1 – 6,0	4,1 – 8,0	51 – 70
Média	6,1 – 9,0	8,1 – 12,0	71 – 80
Alta	> 9,0	> 12,0	> 80

Adaptado de Embrapa, 1982.

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os resultados foram tabulados e submetidos à análise de variância (ANOVA), a 5% de significância para o teste F.

Quando constatados efeitos significativos para os tempos de avaliação foi realizada análise de regressão, sendo escolhido o modelo que melhor se ajustasse ao fenômeno investigado. Quando detectado efeitos significativos dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram realizadas nos programas estatísticos GENES (CRUZ, 2013) e SISVAR (FERREIRA, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ACIDEZ DO SOLO

Houve interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação para a variável pH do solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m. Na camada até 0,10 m os

tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes e explicados por equações polinomiais de 2º grau, atingindo os maiores valores de pH em torno de 15 meses após o início do experimento. Na camada de 0,10-0,20 m esse comportamento se manteve apenas para alguns tratamentos, com os maiores valores em torno de 12 meses (Figura 3).

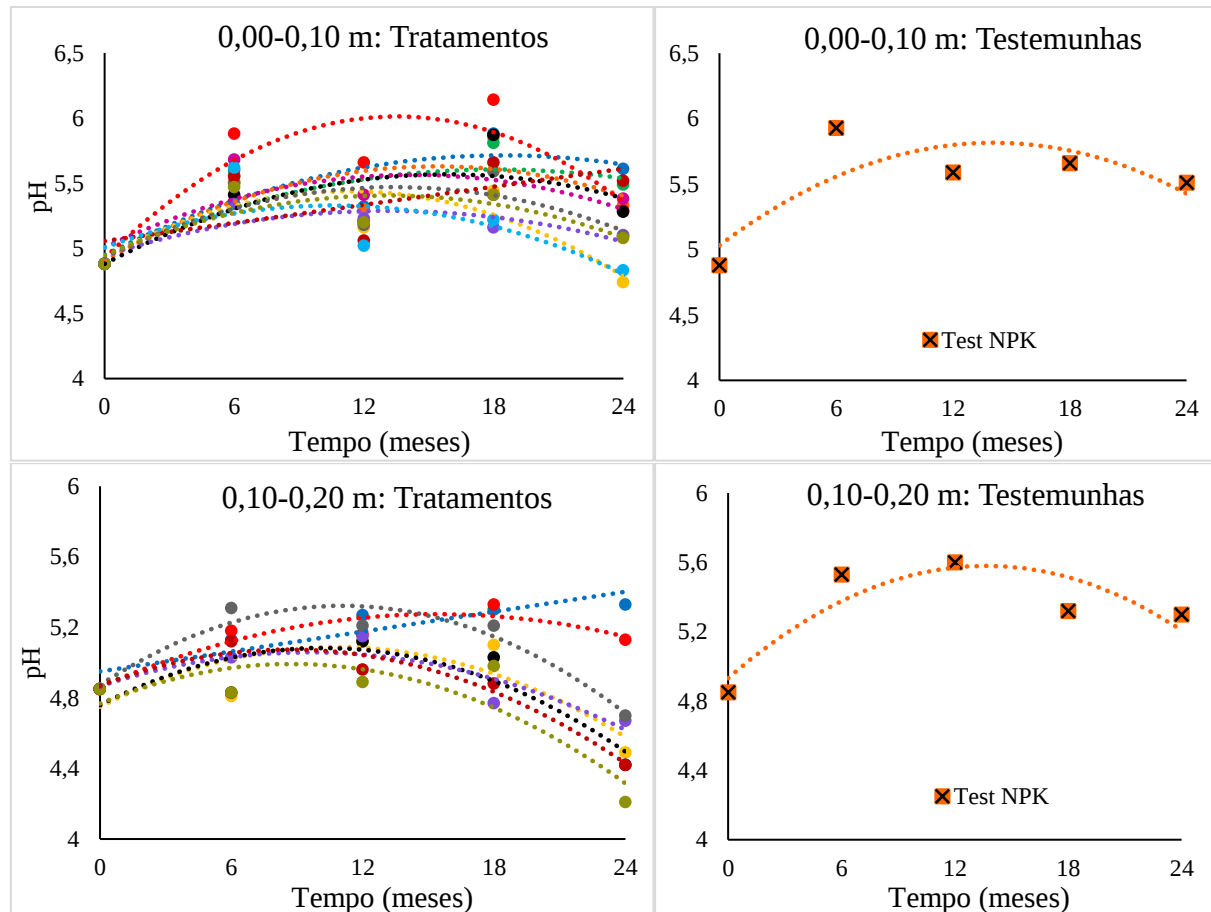


Figura 3. pH do solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (○ Sem remineralizador/Com cama/Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/Ave+nab+tre+erv).

De acordo com as equações de regressão obtidas para cada tratamento é possível observar que na camada de 0,00-0,10 m o tratamento com remineralizador/com cama/Ave+nab apresentou o maior valor de pH (6,00) em um menor tempo de avaliação (13,4 meses) (Tabela 5), um aumento de 23% em relação ao valor de pH inicial da área experimental (Tabela 1).

Na camada de 0,10-0,20 m o maior valor de pH foi verificado na testemunha com adubação NPK aos 13,5 meses (pH = 5,58), contudo, é possível verificar que os demais

tratamentos, cujo efeito foi significativo, também apresentaram aumento no valor de pH até os 12 meses (Tabela 5) quando comparado ao valor de pH obtido inicialmente nessa camada de solo que era inferior a 5,00 (Tabela 1).

Tabela 5. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (pH em CaCl_2) para os tratamentos apresentados na figura 3

Tratamento	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m	
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	$*Y = 4,9471 + 0,0833x - 0,0023x^2$ X = 18 meses; Y = 5,70	$R^2 = 0,69$	$*Y = 4,95 + 0,0188x$ X = 24 meses; Y = 5,40	$R^2 = 0,81$
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	$*Y = 4,906 + 0,094x - 0,0031x^2$ X = 15,2 meses; Y = 5,62	$R^2 = 0,65$	Y = ns	
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	$*Y = 4,9477 + 0,0726x - 0,002x^2$ X = 18,2 meses; Y = 5,61	$R^2 = 0,57$	Y = ns	
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	$*Y = 4,9254 + 0,1609x - 0,006x^2$ X = 13,4 meses; Y = 6,00	$R^2 = 0,78$	$*Y = 4,8637 + 0,0533x - 0,0017x^2$ X = 15,7 meses; Y = 5,28	$R^2 = 0,86$
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	$*Y = 4,926 + 0,0908x - 0,004x^2$ X = 11,4 meses; Y = 5,44	$R^2 = 0,67$	$*Y = 4,75 + 0,0628x - 0,0029x^2$ X = 10,8 meses; Y = 5,09	$R^2 = 0,66$
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	$*Y = 4,8809 + 0,0867x - 0,0027x^2$ X = 16 meses; Y = 5,58	$R^2 = 0,57$	$*Y = 4,7591 + 0,0633x - 0,0031x^2$ X = 10,2 meses; Y = 5,08	$R^2 = 0,74$
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	$*Y = 4,9471 + 0,052x - 0,002x^2$ X = 13 meses; Y = 5,29	$R^2 = 0,67$	$*Y = 4,8666 + 0,0401x - 0,0021x^2$ X = 9,6 meses; Y = 5,06	$R^2 = 0,78$
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	$*Y = 5,0074 + 0,0784x - 0,0028x^2$ X = 14 meses; Y = 5,56	$R^2 = 0,57$	Y = ns	
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 4,9303 + 0,0804x - 0,003x^2$ X = 13,4 meses; Y = 5,47	$R^2 = 0,55$	$*Y = 4,8731 + 0,081x - 0,0037x^2$ X = 11 meses; Y = 5,32	$R^2 = 0,92$
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 5,056 + 0,0232x$ X = 24 meses; Y = 5,61	$R^2 = 0,41$	$*Y = 4,8689 + 0,0474x - 0,0027x^2$ X = 8,8 meses; Y = 5,08	$R^2 = 0,95$
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 5,0054 + 0,0612x - 0,0029x^2$ X = 10,6 meses; Y = 5,33	$R^2 = 0,43$	Y = ns	
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 4,9457 + 0,0704x - 0,0027x^2$ X = 13 meses; Y = 5,40	$R^2 = 0,62$	$*Y = 4,768 + 0,0512x - 0,0029x^2$ X = 8,8 meses; Y = 4,99	$R^2 = 0,74$
Testemunha Absoluta	Y = ns		Y = ns	
Testemunha NPK	$*Y = 5,0317 + 0,1113x - 0,0039x^2$ X = 14,3 meses; Y = 5,83	$R^2 = 0,63$	$*Y = 4,932 + 0,0948x - 0,0035x^2$ X = 13,5 meses; Y = 5,58	$R^2 = 0,78$
Médias (por grupo de associação)				
Tratamento	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m	
	X (meses)	Y (pH)	X (meses)	Y (pH)
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	14,3	5,54	15,3	5,27
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	18,4	5,60	9,5	5,08
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	13,9	5,41	9,6	5,06
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	13,5	5,65	12,3	5,14
Testemunha Absoluta	-	5,08	-	4,96
Testemunha NPK	14,3	5,83	13,5	5,58

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro. ns: equação não significativa.

De forma geral, é possível estabelecer que quando o remineralizador foi associado à cama de frango e aos consórcios de plantas de cobertura (independentemente do consórcio) houve um aumento de 11,2% no valor de pH (valor médio de 5,65) na camada de 0,00-0,10 m em relação à testemunha absoluta (5,08). Quando houve apenas a utilização dos consórcios isoladamente o valor médio de pH foi de 5,54; na combinação entre cama de frango e consórcios

o valor médio foi de 5,60 e quando o remineralizador foi associado apenas aos consórcios de plantas de cobertura o valor médio de pH obtido foi de 5,41, representando aumentos de 9%, 11% e 6%, respectivamente em relação à testemunha absoluta (Tabela 5).

Esses resultados demonstram que, independentemente do tratamento utilizado, houve aumento nos valores de pH em relação à testemunha absoluta, indicando que a utilização seja do remineralizador, da cama de frango ou das plantas de cobertura proporcionou melhoria na condição de pH em que o solo se encontrava, de forma semelhante à testemunha com adubação NPK (5,83).

É possível verificar que o pH da área que inicialmente era classificado como pH médio (4,5-4,9) na camada de 0,00-0,20 m, de acordo com o Manual de Adubação de Calagem para o Estado do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2019), passou para valores de pH altos (5,0-5,5) a muito altos (>5,5), independente do tratamento utilizado, com exceção da testemunha absoluta que se manteve na condição de pH médio.

Vale destacar que esse aumento nos valores de pH provavelmente tenha ocorrido em função da solubilização dos minerais constituintes do remineralizador e não necessariamente por um efeito de correção da acidez do solo. Como o remineralizador possui teores significativos de óxidos de cálcio e magnésio (8,77% de CaO e 4,40% de MgO), a partir da solubilização do material pode ter ocorrido uma maior liberação desses elementos em solução, aumentando a saturação da CTC por esses cátions de reação básica (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Uma vez que o H^+ está na solução do solo ele tende a se ligar ao OH^- liberado pela dissolução dos minerais constituintes do remineralizador, ocorrendo a neutralização da acidez e aumentando as bases ocupando as cargas de superfície dos colóides que anteriormente eram ocupadas pelo H^+ . A dissolução dos minerais silicatados também interfere na acidez do solo porque são fonte de silício (Si) e o Si solúvel pode neutralizar a acidez do solo, pois o ácido silícico (H_4SiO_4) é um ácido fraco com valor de pK elevado (9,7), ou seja, com menor tendência de liberar íons H^+ (SANTOS, 2020).

Ratke et al. (2020) também verificaram aumento do pH do solo com a aplicação de remineralizador e atribuíram esse resultado à presença de SiO_2 na sua composição mineralógica. De acordo com Menegale et al. (2015) os materiais contendo o íon silicato (SiO_2) em sua composição promovem a elevação do pH do solo, podendo ser utilizados como corretivos da acidez do solo.

Por outro lado, Ferreira et al. (2009) utilizando remineralizador de forma isolada para a correção do pH do solo verificaram que o material não contribuiu para uma significativa

elevação do pH após um ano da aplicação do material, argumentando que a utilização unicamente do remineralizador na correção da acidez em solos com alto poder tampão é pouco provável, devido ser necessário a aplicação de altas doses.

Vale salientar que nos sistemas de produção avícola ocorre a adição de cal virgem (CaO) à cama como método de desinfecção, fazendo com que o pH das camas de frango seja elevado (OVIEDO-RONDÓN, 2008). Quando a cal virgem presente na cama de frango reage com a água presente no solo ocorre a formação de hidróxido de cálcio (CaOH_2), que reage com os íons H^+ , aumentando o pH do solo (HUBNER, 2023).

Lima et al. (2007) ao avaliar a influência da adubação com cama de frango em doses crescentes de até 20 Mg ha^{-1} em um Latossolo Vermelho distrófico não verificaram diferenças de pH entre a adubação orgânica e mineral (100 kg ha^{-1} de N na forma de uréia). Contudo, em relação à testemunha sem adubação houve diferença de pH, obtendo-se valor máximo de 5,36 com a aplicação de $11,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de cama de frango, enquanto na ausência de cama de frango o valor de pH foi de 5,17.

Isso é possível, pois, os compostos orgânicos originados a partir da decomposição de resíduos orgânicos podem complexar cátions de reação ácida como Fe^{2+} , Mn^{2+} e Al^{3+} na solução do solo, liberando ânions como OH^- e HCO_3^- , que causam a precipitação do alumínio e aumentam o pH (PETRERE; ANGHINONI, 2001).

Moreti et al. (2007) também verificaram maior valor de pH do solo com a utilização de adubo orgânico de origem animal. Os autores utilizaram 14 Mg ha^{-1} de esterco de galinhas poedeiras, o que proporcionou pH de 5,8 na camada de 0,00-0,10 m, sendo superior aos valores de pH obtidos com a utilização de adubação mineral, com o cultivo de crotalaria ou de milho e em relação à testemunha, que apresentaram média de pH de 5,1. Nesse caso, a utilização de uma fonte orgânica de adubo promoveu um incremento de 13% no valor de pH e os autores atribuíram esse aumento ao fato de que quando a matéria orgânica proveniente do adubo orgânico é mineralizada há aumento das cargas negativas do solo, elevando o pH.

O aumento do pH do solo a partir da utilização de compostos orgânicos também pode ser resultado da dissociação de CaCO_3 que geralmente é encontrado nas excretas animais, promovendo o consumo de H^+ (WHALEN et al., 2000). Os esterco animais podem ainda aumentar a adsorção de Al^{3+} trocável, sobretudo nas frações de ácidos húmicos e fúlvicos da matéria orgânica (CERETTA et al., 2003), reduzindo a toxicidade para as raízes das plantas e aumentando a adsorção de H^+ (LOURENZI et al., 2016). Essas alterações podem estar associadas ao aumento do pH do solo (BRUNETTO et al., 2012).

Em trabalho realizado por Ning et al. (2020) avaliando solos tratados por mais de 25 anos com fertilizantes orgânicos e inorgânicos (NPK) nas principais áreas produtoras da China, verificaram que em solos ácidos a aplicação contínua de fertilizantes inorgânicos acidificou significativamente o solo, com uma redução de 1,21 unidades de pH, enquanto que com a utilização de fertilizantes orgânicos essa acidificação foi minimizada. Os autores sugerem que isso ocorreu pelo fato de que a fertilização inorgânica de longo prazo esgotou os íons trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} e aumentou os íons trocáveis de H^+ e Al^{3+} , além de que uma grande quantidade de cátions básicos é removida pela colheita fazendo com que o solo precise gerar uma quantidade igual de prótons para manter as cargas, resultando em redução de pH e acidificação.

As plantas de cobertura também são capazes de modificar quimicamente a solução do solo, sobretudo na região da rizosfera. Isso pode ocorrer tanto pela liberação de íons H^+ e OH^- , quanto pela exsudação de ácidos orgânicos (MANNING et al. 2017). Posteriormente, com a mineralização da matéria orgânica também ocorre a liberação de ácidos orgânicos e de minerais que promovem o aumento das cargas negativas do solo, elevando o pH (FAVARATO et al. 2015). Além disso, as reações de troca de ligantes entre ânions orgânicos e os grupos terminais OH^- dos óxidos de Fe e Al também estão como as causas da elevação do pH do solo a partir de resíduos vegetais (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Em trabalho realizado por Amaral et al. (2004a) avaliando o efeito de plantas de cobertura como aveia-preta, nabo-forrageiro e ervilhaca comum nas características químicas do solo em casa de vegetação verificaram que, entre os resíduos vegetais, o nabo-forrageiro foi o mais eficiente em aumentar o pH, contudo, isso ocorreu somente até a profundidade de 0,03 m. Os autores atribuíram essa elevação do pH do solo à capacidade de neutralização de hidrogênio (CNH) que envolve reações de adsorção na superfície do material vegetal e a protonação de ácidos orgânicos cuja constante de dissociação (pK) seja maior do que o pH do solo, pois, nesse caso, haverá um aumento no pH devido à associação de H^+ do solo com alguns ânions orgânicos (RITCHIE; DOLLING, 1985).

Dessa forma, a ação dos resíduos vegetais na elevação do pH do solo pode ocorrer de forma semelhante ao que ocorre com a aplicação de adubos orgânicos, visto que ocorre a adição de cátions básicos e aumento da matéria orgânica (NING et al., 2020), contudo, o efeito verificado de resíduos vegetais na redução da acidificação do solo tem sido menor do que o efeito dos adubos orgânicos de origem animal devido à sua baixa alcalinidade (DONG et al., 2021; SIEDT et al., 2021).

Com base nisso, uma alternativa no manejo da adubação de solos com remineralizador é usá-lo em associação com materiais que modifiquem o pH do meio. Isso porque a alteração

de minerais se dá principalmente por hidrólise, que é controlada pelas reações ácido-base e pelas ligações oxigênio-metal, que provocam adsorção de íons H^+ e OH^- nas superfícies minerais (RIBEIRO et al., 2010).

Além disso, a manutenção de resíduos vegetais na superfície, bem como a utilização de adubos orgânicos como a cama de frango, melhora a agregação do solo através do aumento do teor de matéria orgânica, formando agregados maiores e aumentando as taxas de infiltração de água no solo. Esse aumento da infiltração pode favorecer o deslocamento das partículas do remineralizador aplicado na superfície juntamente com a água percolada, promovendo efeitos nas camadas mais subsuperficiais (CAIRES, 2013).

Dessa forma, é possível também que o efeito do remineralizador em profundidades maiores que 0,10 m seja similar ao efeito do calcário quando aplicado na superfície, em que o deslocamento mecânico das partículas do produto por meio de canais formados por raízes, ou a movimentação de Ca e Mg trocáveis por meio de complexos orgânicos hidrossolúveis atue na elevação do pH em subsuperfície (AMARAL et al., 2004b). Entretanto, considerando a baixa solubilidade do remineralizador e a grande quantidade de material que seria necessária para corrigir a acidez do solo em subsuperfície, essa contribuição do remineralizador para as camadas mais profundas deve ser pequena.

Assim, os efeitos verificados na camada de 0,10-0,20 m podem representar mais um efeito da dinâmica das plantas de cobertura e da cama de frango do que diretamente do remineralizador utilizado, visto que a variação de pH entre os tratamentos com e sem remineralizador não foi tão evidente, indicando que as alterações no pH nessa camada tiveram mais influência dos consórcios de plantas de cobertura e da cama de frango.

Para a variável H^+Al (acidez potencial) houve interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação somente na camada de 0,00-0,10 m, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m houve efeito significativo isolado para os tempos de avaliação. Em ambas camadas foi verificado efeito inverso ao pH do solo, com os valores de H^+Al reduzindo ao longo do período de avaliação. Os tratamentos apresentaram comportamentos explicados por equações polinomiais de 2º grau e por equações lineares, à exceção dos tratamentos com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv e sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv que não apresentaram efeito significativo (Figura 4).

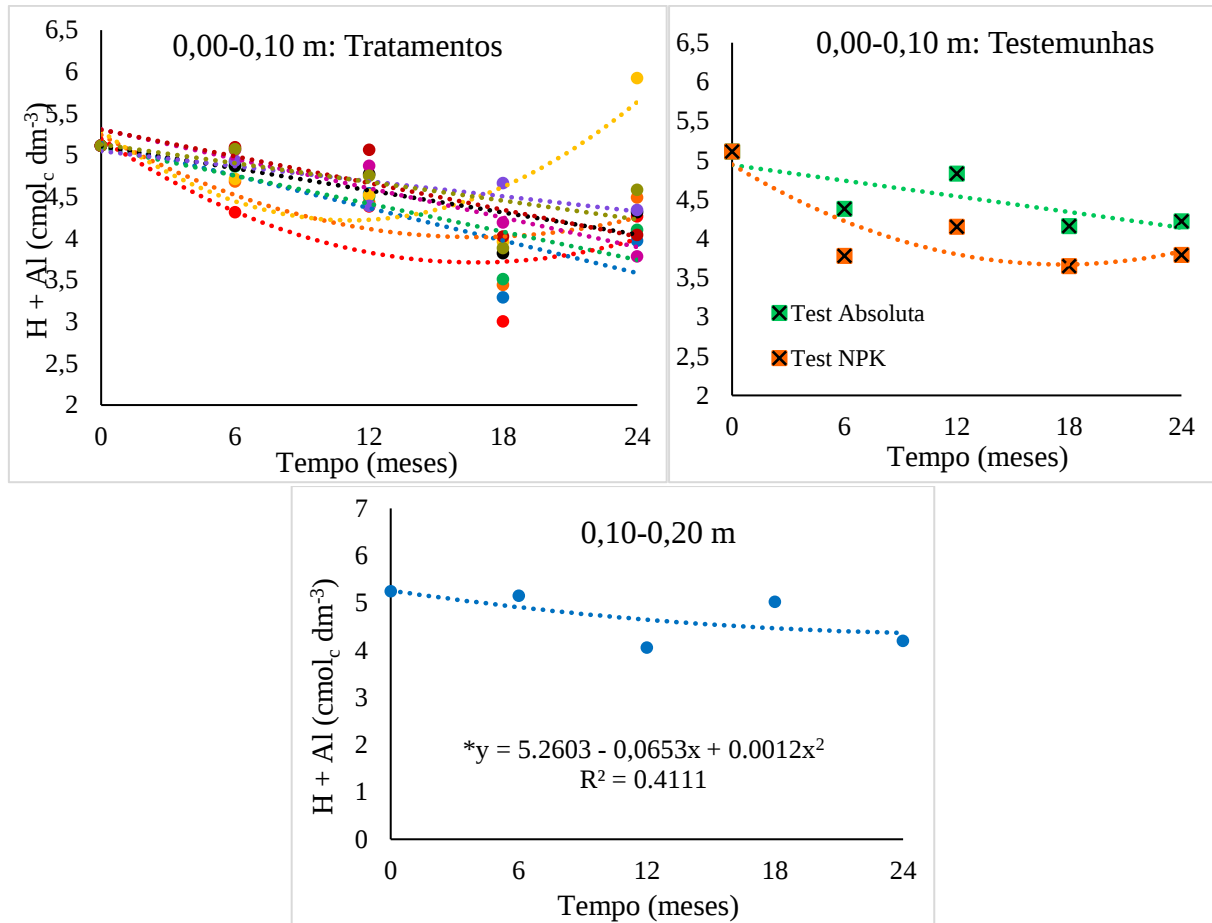


Figura 4. Teor de H+Al (cmol_c dm⁻³) no solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador, Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

É comum o decréscimo da acidez potencial com o aumento do pH do solo, sendo que a redução da acidez potencial até o pH 5,0 é atribuído principalmente a neutralização da acidez trocável (Al³⁺), enquanto que acima desse valor à acidez não trocável. Além disso, o decréscimo não linear da acidez potencial (H+Al) em alguns casos pode ser atribuído às variações mineralógicas do solo, visto que em solos mais cauliniticos ou oxídicos, com baixa quantidade de argilas 2:1, a variação da acidez potencial tende a ser menor, o que pode ser atribuído à menor retenção de H+Al nas argilas (SILVA et al., 2008).

De forma geral, os tratamentos apresentaram redução dos valores de H+Al na camada de 0,00-0,10 m para valores muito próximos, variando de 3,58 a 4,32 cmol_c dm⁻³ até os 24 meses de avaliação, sendo que essa redução também ocorreu nas testemunhas (Tabela 6),

indicando que possivelmente os resultados sejam mais um reflexo do aumento do pH do solo do que em função de algum tratamento utilizado.

Na camada de 0,10-0,20 m o menor valor de H⁺Al (4,37 cmol_c dm⁻³) foi obtido aos 27,2 meses, sem efeito significativo para os tratamentos com plantas de cobertura, cama de frango, remineralizador ou adubação química com NPK, o que pode ter ocorrido como reflexo da mudança de pH que ocorreu nessa camada ao longo do tempo, porém, não em níveis suficientes para indicar o efeito direto de algum tratamento utilizado.

Tabela 6. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R²) e valores de X (tempo) e Y (H⁺Al) para os tratamentos apresentados na figura 4

Tratamento		0,00-0,10 m	
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	$*Y = 5,144 - 0,065x$ $R^2 = 0,69$ $X = 24$ meses; $Y = 3,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	$*Y = 5,308 - 0,0588x$ $R^2 = 0,90$ $X = 24$ meses; $Y = 3,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	$*Y = 5,2431 - 0,147x + 0,0044x^2$ $R^2 = 0,64$ $X = 16,7$ meses; $Y = 4,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	$Y = \text{ns}$
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	$*Y = 5,09 - 0,0562x$ $R^2 = 0,71$ $X = 24$ meses; $Y = 3,74 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 5,306 - 0,0535x$ $R^2 = 0,77$ $X = 24$ meses; $Y = 4,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	$*Y = 5,1954 - 0,1773x + 0,0053x^2$ $R^2 = 0,61$ $X = 16,7$ meses; $Y = 3,71 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	$Y = \text{ns}$
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	$*Y = 5,2914 - 0,1926x + 0,0086x^2$ $R^2 = 0,67$ $X = 11,2$ meses; $Y = 4,21 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 5,128 - 0,0375x$ $R^2 = 0,51$ $X = 24$ meses; $Y = 4,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	$*Y = 5,106 - 0,0442x$ $R^2 = 0,67$ $X = 24$ meses; $Y = 4,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Testemunha Absoluta	$*Y = 4,94 - 0,0333x$ $R^2 = 0,59$ $X = 24$ meses; $Y = 4,14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	$*Y = 5,048 - 0,0302x$ $R^2 = 0,73$ $X = 24$ meses; $Y = 4,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Testemunha NPK	$*Y = 4,9457 - 0,1447x + 0,0041x^2$ $R^2 = 0,75$ $X = 17,6$ meses; $Y = 3,67 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
Tratamento		0,10-0,20 m	
Tempo de avaliação		$*Y = 5,2603 - 0,0653x + 0,0012x^2$ $R^2 = 0,41$ $X = 27,2$ meses; $Y = 4,37 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	
Médias (por grupo de associação)			
Tratamento		0,00-0,10 m	
	X (meses)	Y (cmol _c dm ⁻³)	
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	17,6	3,90	
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	21,6	4,03	
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	24	4,03	
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	21,6	3,95	
Testemunha Absoluta	24	4,14	
Testemunha NPK	17,6	3,67	
		0,10-0,20 m	
Tempo	27,2	4,37	

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro. ns: equação não significativa.

Contudo, os resultados obtidos na camada mais superficial podem ser decorrentes da complexação dos íons H⁺ e Al³⁺ com compostos orgânicos aniônicos provenientes dos resíduos

vegetais (nas testemunhas houve grande incidência de plantas daninhas) e da cama de frango, o que reduz a acidez potencial do solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Como as testemunhas foram mantidas sem o cultivo de plantas de cobertura isso ocasionou uma grande incidência de plantas daninhas nessas áreas e, após o manejo, estas permaneceram na área como resíduos vegetais, podendo ter atuado na ciclagem de nutrientes e no aumento de matéria orgânica de forma semelhante às plantas de cobertura. Dessa forma, a matéria orgânica pode ter alterado o comportamento do Al retido na superfície dos coloides.

Isso ocorre pela formação de complexos organo-metálicos hidrossolúveis, onde o Ca e o Mg dos complexos orgânicos são deslocados pelo alumínio, visto que íons Al^{3+} formam complexos mais estáveis do que Ca^{2+} e Mg^{2+} , contribuindo para a redução da atividade do Al e do seu potencial químico (CAIRES, 2013).

Michelon et al. (2019) avaliando diferentes plantas de cobertura, entre elas aveia-preta, nabo forrageiro, tremoço e ervilha forrageira não verificaram alteração nos valores de H+Al no solo após 4 anos. Os valores de H+Al se situaram entre 3,34 e 4,08 $cmol_c\ dm^{-3}$, sendo semelhantes aos obtidos no presente trabalho. Vale destacar que os autores realizaram a calagem na área para elevar o pH a 6,0, o que pode ter contribuído para a ausência de efeitos significativos das plantas de cobertura em reduzir a acidez potencial.

Em trabalho realizado por Conceição et al. (2022) avaliando doses de remineralizador basáltico (0, 2, 4, 6 e 8 $Mg\ ha^{-1}$) em um Latossolo Vermelho distrófico, verificaram que a utilização da maior dose de pó de basalto proporcionou um aumento de 15% no pH e redução de 26% nos valores de H+Al, em relação às amostras sem remineralizador de basalto. Os autores sugerem que o aumento do pH devido à aplicação de remineralizador foi promovido pela reação dos carbonatos de Ca e Mg com o H^+ do solo, liberando água e dióxido de carbono, o que consequentemente também levou à neutralização do Al em solução e redução dos valores de H+Al.

Souza et al. (2017) ao avaliarem quatro doses de remineralizador basáltico (0, 2, 4 e 8 $Mg\ ha^{-1}$) com quatro coberturas de solo (pousio, crotalária, milheto e braquiária), também verificaram que houve redução dos valores de H+Al conforme o aumento da dose de remineralizador para todas as plantas de cobertura, reduzindo em média de 3,0 $cmol_c\ dm^{-3}$ para 2,3 $cmol_c\ dm^{-3}$.

Moreti et al. (2007) observaram decréscimo na acidez potencial (H+Al) do solo na camada de 0,00-0,10 m com a aplicação de 14 $Mg\ ha^{-1}$ de esterco de galinhas poedeiras e os autores relacionaram este fato à redução do Al^{3+} e ao aumento do pH proporcionado pelo esterco.

A cama de frango utilizada apresentava pH alcalino (8,11 e 7,6) (Tabela 3) indicando que a aplicação dessa fonte pode ter contribuído para a redução da acidez potencial também devido a esse ponto. Gotz et al. (2019) verificaram uma redução de 38% na acidez potencial do solo na camada de 0,00-0,10 m (redução de 4,02 para 2,48 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) com a aplicação de 3 Mg ha^{-1} de remineralizador associado a esterco bovino e associaram essa redução ao pH do esterco (6,6) estar próximo da neutralidade, bem como, pela adição de matéria orgânica básica e de quantidade considerável de Ca.

Por outro lado, Santos et al. (2014) verificaram aumento da acidez potencial do solo com a aplicação de cama de frango até a dose de 7,5 Mg ha^{-1} e até a profundidade de 0,15 m e os autores atribuíram isso à mineralização do nitrogênio orgânico e posterior nitrificação que contribuem para a acidificação do solo. Oreoluwa et al. (2020) pontuam que casos onde a aplicação de cama de frango ocasiona aumento dos valores de H^+Al pode ser decorrente do aumento no nível de acidez trocável (Al^{3+}) no solo, ocasionada pela adsorção de cátions ácidos nos colóides do solo que são liberados na solução do solo para substituir aqueles neutralizados por efeitos corretivos.

Como a redução da acidez potencial do solo seguiu a mesma ordem verificada pelo aumento do pH do solo, isso sugere que o aumento do pH é a principal razão para a redução da acidez potencial do solo verificada no presente trabalho. Outra questão a se considerar é que com o aumento do pH ocorre a transformação do Al^{3+} trocável em íons de hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ou em precipitados de Al, reduzindo a acidez trocável do solo; as maiores concentrações de fósforo nos resíduos adicionados também pode ser responsável pela precipitação de Al com fosfato no solo e, assim, reduzir o Al^{3+} trocável, o que também contribui para a redução da acidez potencial, uma vez que é composta pela soma da acidez trocável e não trocável do solo (MASUD et al., 2020).

Além disso, com a adição de remineralizador, cama de frango e resíduos vegetais ao solo há a liberação de cátions básicos como K, Ca e Mg e estes podem substituir o Al^{3+} e o H^+ trocáveis na superfície carregada negativamente do solo e assim reduzir a acidez trocável do solo e aumentar a neutralização da acidez potencial do solo.

3.6 SATURAÇÃO POR BASES (V%) E CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA (CTC)

Foi verificada interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação para a saturação por bases do solo nas duas camadas de solo avaliadas. As respostas dos tratamentos ao longo do tempo foram explicadas por equações polinomiais de 2º grau e por

equações lineares, com exceção do tratamento com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv nas duas camadas, e dos tratamentos sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv, e com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv na camada de 0,10-0,20 m que não apresentaram equações significativas pela análise de regressão (Figura 5).

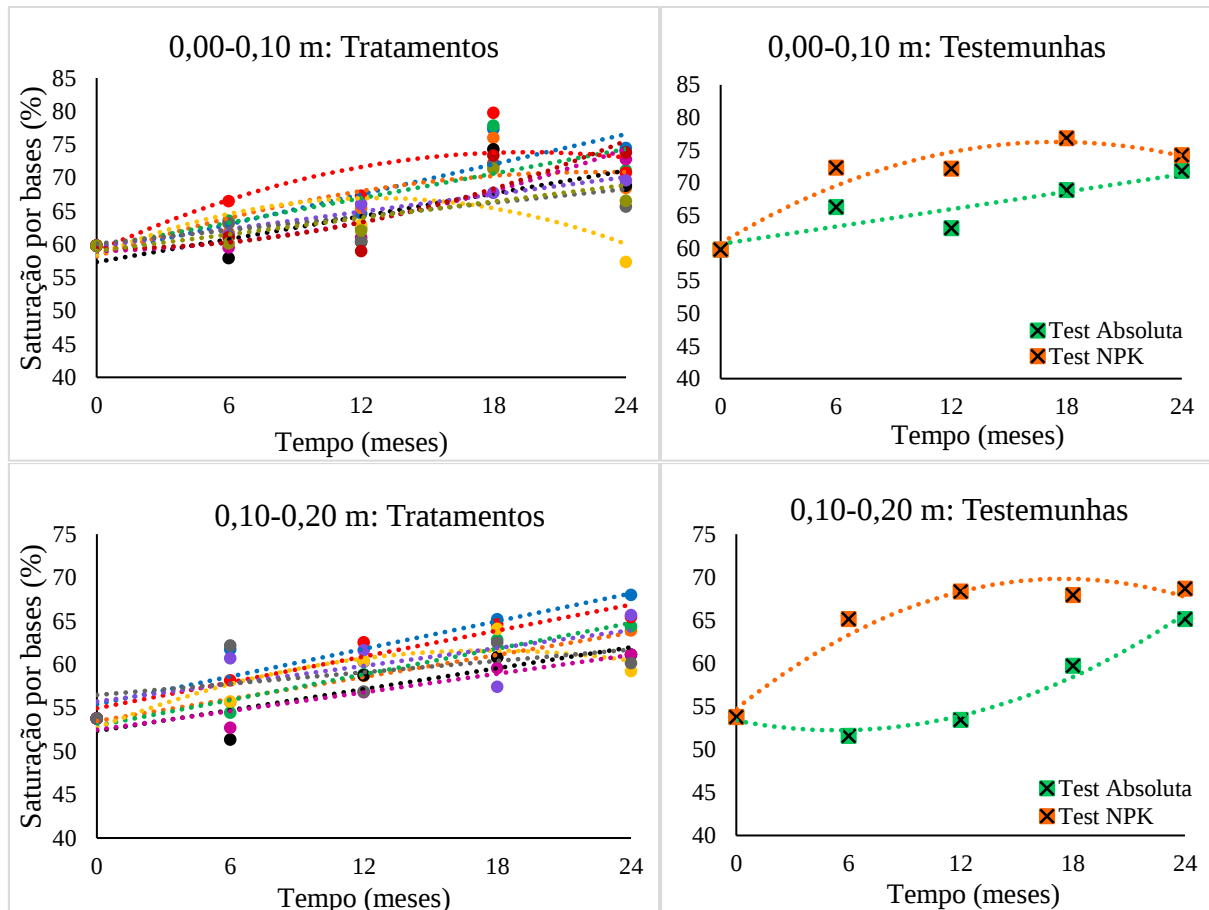


Figura 5. Saturação por bases (%) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (○ Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

A maioria dos tratamentos se mostraram eficientes em elevar a saturação por bases acima de 70% na camada de 0,00-0,10 m e acima de 60% na camada de 0,10-0,20 m. Na camada de 0,00-0,10 m apenas três tratamentos não apresentaram saturação por bases acima de 70%: o tratamento sem remineralizador/sem cama/tre+erv com valor de 66,93%, o tratamento sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv com valor de 68,31% e o tratamento com remineralizador/com cama/ ave+nab+tre+erv com valor de 68,91% (Tabela 7).

Tabela 7. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (saturação por bases) para os tratamentos apresentados na figura 5, de acordo com a camada de solo avaliada

Tratamento	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m	
	X (meses)	Y (%)	X (meses)	Y (%)
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	*Y = 58,476 + 0,7537x X = 24 meses; Y = 76,57%	$R^2 = 0,82$	*Y = 55,41 + 0,5318x X = 24 meses; Y = 68,17%	$R^2 = 0,88$
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 58,195 + 1,106x - 0,0241x ² X = 23 meses; Y = 70,88%	$R^2 = 0,68$	*Y = 53,47 + 0,4238x X = 24 meses; Y = 63,64%	$R^2 = 0,99$
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	*Y = 59,54 + 0,6157x X = 24 meses; Y = 74,32%	$R^2 = 0,62$	*Y = 52,934 + 0,4933x X = 24 meses; Y = 64,77%	$R^2 = 0,96$
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 58,922 + 1,5287x - 0,0392x ² X = 19,5 meses; Y = 73,83%	$R^2 = 0,72$	*Y = 54,944 + 0,4972x X = 24 meses; Y = 66,88%	$R^2 = 0,93$
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	*Y = 58,367 + 1,3535x - 0,0535x ² X = 12,6 meses; Y = 66,93%	$R^2 = 0,42$	*Y = 52,697 + 1,0118x - 0,0288x ² X = 17,6 meses; Y = 61,58%	$R^2 = 0,80$
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 57,328 + 0,5728x X = 24 meses; Y = 71,08%	$R^2 = 0,60$	*Y = 52,318 + 0,4022x X = 24 meses; Y = 61,97%	$R^2 = 0,76$
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	*Y = 59,688 + 0,4342x X = 24 meses; Y = 70,11%	$R^2 = 0,97$	*Y = 55,722 + 0,342x X = 24 meses; Y = 63,93%	$R^2 = 0,52$
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 58,942 + 0,0909x + 0,023x ² X = 2 meses; Y = 59,22%	$R^2 = 0,86$	*Y = 52,464 + 0,3592x X = 24 meses; Y = 63,93%	$R^2 = 0,89$
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 60,074 + 0,343x X = 24 meses; Y = 68,31%	$R^2 = 0,44$	*Y = 56,472 + 0,218x X = 24 meses; Y = 61,70%	$R^2 = 0,31$
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 59,417 - 0,0299x + 0,0293x ² X = 1 mês; Y = 59,42%	$R^2 = 0,79$	Y = ns	
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	Y = ns		Y = ns	
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 59,004 + 0,4127x X = 24 meses; Y = 68,91%	$R^2 = 0,63$	Y = ns	
Testemunha Absoluta	*Y = 60,622 + 0,4448x X = 24 meses; Y = 71,30%	$R^2 = 0,79$	*Y = 53,356 - 0,4206x + 0,039x ² X = 5,4 meses; Y = 52,22%	$R^2 = 0,98$
Testemunha NPK	*Y = 60,721 + 1,7735x - 0,0507x ² X = 17,5 meses; Y = 76,23%	$R^2 = 0,91$	*Y = 54,703 + 1,7268x - 0,0493x ² X = 17,5 meses; Y = 69,82%	$R^2 = 0,95$

Médias (por grupo de associação)							
Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m		
	X (meses)		Y (%)		X (meses)		Y (%)
	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx Min
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	20,2	-	70,60	-	21,9	-	63,82 -
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	23,5	1	70,98	59,42	24	-	62,81 -
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	24	-	72,22	-	24	-	64,35 -
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	21,8	2	71,37	59,22	24	-	65,41 -
Testemunha Absoluta	24	-	71,30	-	-	5,4	- 52,22
Testemunha NPK	17,5	-	76,23	-	17,5	-	69,82 -

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro. ns: equação não significativa.

Considerando que a saturação por bases no início do experimento na camada de 0,00-0,10 m era em média cerca de 60% (Tabela 1) e considerando as médias obtidas para cada fator isoladamente até os 24 meses de avaliação, é possível observar que houve um aumento para 73,90%, 70,62% e 70,93% quando foi utilizado o consórcio de aveia + nabo, tremoço + ervilha e aveia + nabo + tremoço + ervilha, respectivamente, e para 72,31% e 72,44% quando foi utilizado o remineralizador basáltico e a cama de frango, respectivamente. Nesses casos houve

um aumento de mais de 10 pontos sobre a saturação por bases, o que representa incrementos entre 17 e 23%.

Na camada de 0,10-0,20 m a saturação por bases inicial na área era em média de 54% (Tabela 1) e houve elevação para 65,86% e 62,85% com os consórcios de aveia + nabo e tremoço + ervilha, respectivamente, e para 64,88% e 64,10% com a utilização do remineralizador e da cama de frango, respectivamente (Tabela 7). Esses aumentos também foram cerca de 10 pontos, como na camada superficial, ou seja, um incremento percentual de 16 a 22% em relação ao valor verificado no início do experimento.

Contudo, esses aumentos também foram verificados na testemunha absoluta na camada de 0,00-0,10 m que apresentou valor de saturação por bases de 71,30% até os 24 meses de avaliação e na testemunha com adubação NPK nas duas camadas, com valor de 76,23% na camada de 0,00-0,10 m aos 17,5 meses e de 69,82% na camada de 0,10-0,20 m também aos 17,5 meses. Diante disso, a testemunha absoluta apresentou incremento de 18% e a testemunha com adubação NPK de 27% e de 29% em cada camada de solo avaliada.

Esses resultados são reflexo dos incrementos nos teores de bases trocáveis no solo, uma vez que houve aumento nos teores de K, Ca e Mg no solo nas duas camadas avaliadas e para todos os tratamentos, sendo que a variação na saturação ao longo do tempo pode ter ocorrido em função dos próprios tratamentos, de acordo com os teores de bases verificados em cada um deles. O aumento no pH do solo e a redução dos teores de H⁺Al também tem influência sobre a saturação por bases, visto que em pH maiores os cátions básicos podem substituir o Al³⁺ e o H⁺ trocáveis na CTC, elevando a saturação por bases do solo.

Guimarães et al. (2016) também verificou aumento da saturação por bases do solo com a utilização de cama de frango. Foi constatado que a saturação inicial de 32% elevou para 49% com a aplicação de doses de cama de frango até 12 Mg ha⁻¹. Verifica-se que embora tenha ocorrido aumento dos valores, a saturação por bases permaneceu em níveis baixos, o que é reflexo da baixa fertilidade inicial da área que apresentava baixos teores de bases trocáveis (0,11, 1,60 e 0,70 cmol_c dm⁻³ de K, Ca e Mg, respectivamente), altos valores de H⁺Al (5,12 cmol_c dm⁻³) e pH baixo (4,9); e embora os teores de bases tenham aumentado para 0,26, 1,80 e 1,10 70 cmol_c dm⁻³ de K, Ca e Mg, respectivamente, e o de H⁺Al tenha reduzido para 3,30 cmol_c dm⁻³, a proporção de bases na CTC em relação aos valores de H⁺Al foi menor.

Resultado semelhante foi verificado por Tabolka (2016) que também constatou aumento na saturação por bases com a aplicação de cama de frango ao longo de 4 anos de avaliação, contudo, os efeitos significativos ocorreram apenas na camada superficial do solo (0,00-0,025 m). Dependendo do ano de avaliação esse aumento variou de 5 a 10% e ocorreu

com relação linear e diretamente proporcional ao aumento do pH do solo, além de estar ligada ao acréscimo nos teores de elementos básicos no solo provenientes da cama de frango.

Ribeiro et al. (2010) trabalhando com remineralizadores das rochas flogopitito (5,73% de K_2O), ultramáfica alcalina (2,79% de K_2O) e brecha piroclástica (1,69% de K_2O) em experimento conduzido em casa de vegetação com amostras de Latossolo Amarelo distrófico, verificaram que apenas a rocha ultramáfica alcalina promoveu aumento significativo na saturação por bases (69%), sobressaindo em relação às demais fontes (média 41%). Da mesma forma, essa rocha promoveu os maiores valores de pH do solo (5,85), de Ca ($1,49 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e de K no solo, indicando correlação entre essas variáveis e a saturação por bases. Além disso, pode-se definir que nem toda rocha atuará de maneira similar sobre os atributos químicos do solo ao longo do tempo, com o efeito sendo dependente das características da própria rocha e das condições edafoclimáticas do local de utilização.

Souza et al. (2017) ao avaliar doses de remineralizador basáltico até 8 Mg ha^{-1} também verificaram aumento na saturação por bases do solo sendo que com a dose de $5,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ foi obtido o maior valor de saturação por bases de 69%. Contudo, quando o remineralizador foi associado à vinhaça como alternativa para acelerar a solubilização do material o comportamento da saturação por bases foi diferente, aumentando de forma linear conforme o aumento das doses até atingir valor de 76% com a maior dose. Esses resultados reforçam a premissa de que o remineralizador é uma alternativa viável de melhoria da fertilidade do solo, sobretudo quando associado a técnicas de manejo que potencializem seu efeito no solo.

Além disso, o acúmulo de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo tem influência sobre o pH e os teores de nutrientes, visto que ocorre maior retenção de cátions liberados pela decomposição dos resíduos das coberturas na camada superficial e pela matéria orgânica do solo atuar reduzindo a lixiviação de nutrientes o que acaba refletindo em alterações nos valores de saturação por bases (BORGES et al., 2014). Embora o incremento de matéria orgânica no solo necessite de longos períodos de tempo, a utilização dos consórcios de plantas de cobertura pela própria ciclagem dos nutrientes, reduzindo a ação dos processos de perdas no solo, já pode ter sido capaz de refletir nos incrementos verificados na saturação por bases.

Para a capacidade de troca catiônica do solo (CTC) também foi verificada interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação, sendo que as respostas dos tratamentos em grande parte seguiram comportamento de aumento linear na camada de 0,00-0,010 m e comportamento quadrático na camada de 0,10-0,20 m. Apenas a testemunha absoluta e o tratamento com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv na camada de 0,10-0,20 m não apresentaram efeito significativo para a análise de regressão (Figura 6).

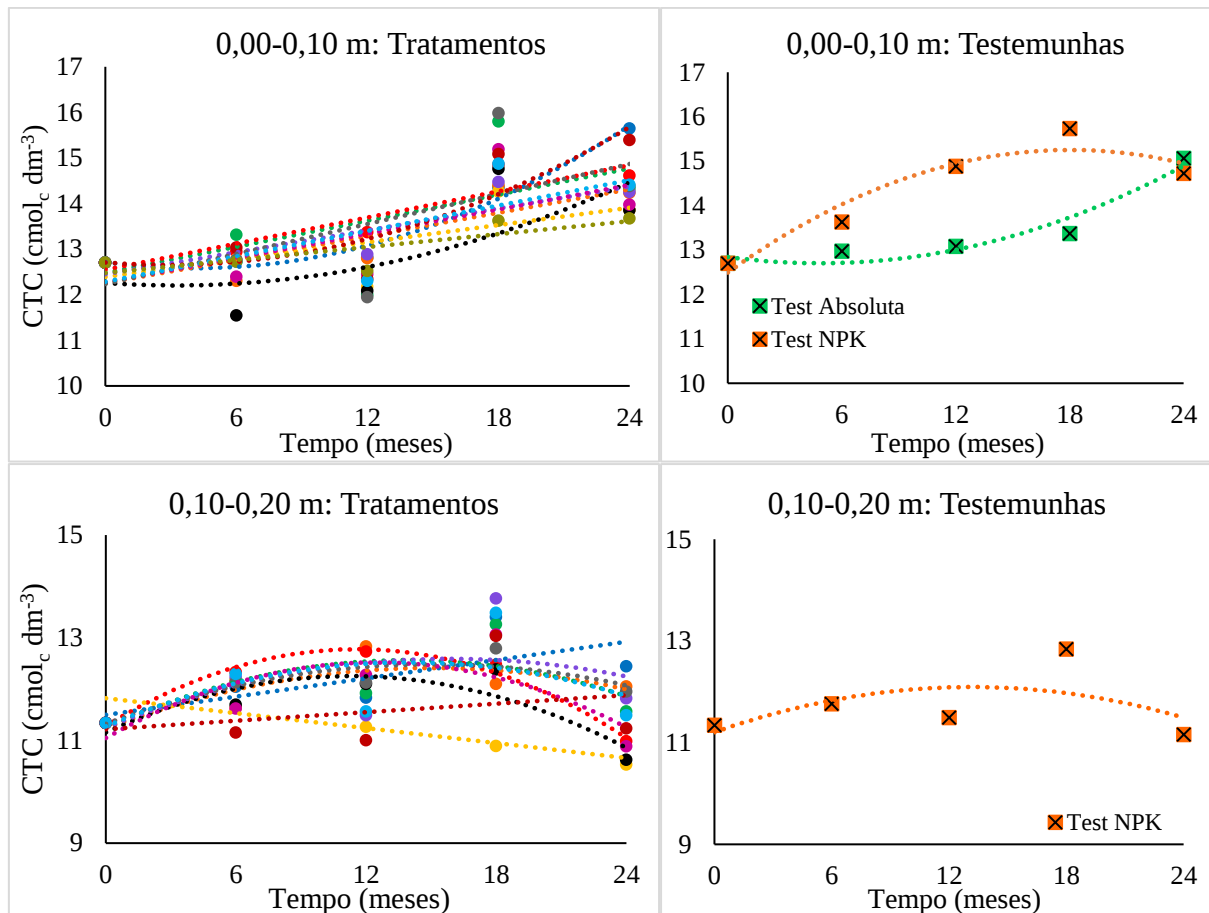


Figura 6. Capacidade de troca catiônica ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

Em geral na camada de 0,00-0,10 m todos os tratamentos apresentaram CTC superior a $13 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ até os 24 meses de avaliação e acima de $10 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na camada de 0,10-0,20 m. Na camada de 0,00-0,10 m três tratamentos atingiram CTC acima de $15 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ até os 24 meses: sem remineralizador/sem cama/ave+nab apresentou CTC de $15,72 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 24 meses; sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv atingiu CTC de $15,66 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 24 meses e a testemunha com adubação NPK que apresentou CTC de $15,25 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 18 meses de avaliação (Tabela 8). Em relação a CTC que o solo apresentava no início do experimento que era em média de $11,25 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ até a profundidade de 0,10 m (Tabela 1), verifica-se que os tratamentos citados promoveram um aumento médio de $4,29 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (38%).

Tabela 8. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (CTC) para os tratamentos apresentados na figura 6, de acordo com a camada de solo avaliada

Tratamento	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m	
	X (meses)	Y (cmol _c dm ⁻³)	X (meses)	Y (cmol _c dm ⁻³)
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	*Y = 12,715-0,0645x+0,0079x ² R ² = 0,98 X = 4 meses; Y = 12,58 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,498+0,0593x R ² = 0,53 X = 24 meses; Y = 12,92 cmol _c dm ⁻³	
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 12,254+0,0858x R ² = 0,72 X = 24 meses; Y = 14,31 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,239+0,1558x-0,0052x ² R ² = 0,66 X = 15 meses; Y = 12,41 cmol _c dm ⁻³	
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	*Y = 12,48+0,0955x R ² = 0,37 X = 24 meses; Y = 14,77 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,243+0,1901x-0,0068x ² R ² = 0,50 X = 14 meses; Y = 12,57 cmol _c dm ⁻³	
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 12,548+0,0955x R ² = 0,86 X = 24 meses; Y = 14,84 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,283+0,258x-0,0112x ² R ² = 0,98 X = 11,5 meses; Y = 12,77 cmol _c dm ⁻³	
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	*Y = 12,392+0,0632x R ² = 0,47 X = 24 meses; Y = 13,91 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,822-0,0485x R ² = 0,56 X = 24 meses; Y = 10,66 cmol _c dm ⁻³	
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 12,259-0,0337x+0,0052x ² R ² = 0,51 X = 3,2 meses; Y = 12,20 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,155+0,1946x-0,0086x ² R ² = 0,74 X = 11,3 meses; Y = 12,26 cmol _c dm ⁻³	
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	*Y = 12,45+0,0802x R ² = 0,76 X = 24 meses; Y = 14,38 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,251+0,1677x-0,0053x ² R ² = 0,30 X = 15,8 meses; Y = 12,58 cmol _c dm ⁻³	
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 12,272+0,089x R ² = 0,48 X = 24 meses; Y = 14,41 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,047+0,2363x-0,0095x ² R ² = 0,58 X = 12,4 meses; Y = 12,52 cmol _c dm ⁻³	
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 12,236+0,1097x R ² = 0,42 X = 24 meses; Y = 14,87 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,321+0,1542x-0,0051x ² R ² = 0,77 X = 15 meses; Y = 12,49 cmol _c dm ⁻³	
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 12,706-0,0376x+0,0067x ² R ² = 0,79 X = 2,8 meses; Y = 12,65 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,218+0,0277x R ² = 0,10 X = 24 meses; Y = 11,88 cmol _c dm ⁻³	
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 12,286+0,0928x R ² = 0,58 X = 24 meses; Y = 14,51 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,273+0,1786x-0,0064x ² R ² = 0,31 X = 14 meses; Y = 12,52 cmol _c dm ⁻³	
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 12,478+0,0473x R ² = 0,66 X = 24 meses; Y = 13,61 cmol _c dm ⁻³		Y = ns	
Testemunha Absoluta	*Y = 12,843-0,0585x+0,006x ² R ² = 0,93 X = 4,9 meses; Y = 12,70 cmol _c dm ⁻³		Y = ns	
Testemunha NPK	*Y = 12,493+0,3061x-0,0085x ² R ² = 0,91 X = 18 meses; Y = 15,25 cmol _c dm ⁻³		*Y = 11,205+0,1349x-0,0051x ² R ² = 0,91 X = 13,2 meses; Y = 12,10 cmol _c dm ⁻³	

Médias (por grupo de associação)								
Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m			
	X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)		X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)	
	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	24	4	14,39	12,58	19,5	24	12,71	10,66
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	24	3	14,31	12,43	16,8	-	12,18	-
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	24	-	14,55	-	14,6	-	12,56	-
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	24	-	14,29	-	12	-	12,65	-
Testemunha Absoluta	-	4,9	-	12,70	-	-	11,11	-
Testemunha NPK	18	-	15,25	-	13,2	-	12,10	-

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro. ns: equação não significativa.

Na camada de 0,10-0,20 m os maiores valores de CTC foram verificados no tratamento sem remineralizador/sem cama/ave+nab com CTC de 12,92 cmol_c dm⁻³ aos 24 meses e com o tratamento com remineralizador/com cama/ave+nab que apresentou CTC de 12,77 cmol_c dm⁻³ aos 11,5 meses de avaliação (Tabela 8). Nesse caso, o aumento da CTC em relação à verificada no início do experimento, que era de 11,34 cmol_c dm⁻³, foi menor ao verificado na camada mais superficial, sendo de 1,51 cmol_c dm⁻³ (13%).

Moreti et al. (2007) observaram relação entre CTC e pH, verificando que a CTC aumentou com o aumento do pH, sendo que esses valores foram obtidos onde os teores de matéria orgânica foram maiores. Isso indica a importância do cultivo com plantas de cobertura e da adubação orgânica sobre o incremento de matéria orgânica no solo e, consequentemente, na melhoria dos atributos químicos do solo.

A interação entre a matéria orgânica e os argilominerais e os óxidos do solo pode alterar as cargas superficiais, pois, a matéria orgânica é adsorvida à caulinita e aos óxidos de ferro, resultando na diminuição das cargas positivas do solo e aumentando, consequentemente, a CTC do solo; portanto, à medida que aumenta o conteúdo de carbono orgânico em um solo de carga variável, o pH do ponto de carga zero é diminuído, ocasionando o aumento da CTC (MEURER, 2017).

Wulanningtyas et al. (2021) verificaram que o cultivo de plantas de cobertura com ervilhaca peluda e centeio afetaram a CTC do solo, demonstrando que a CTC do solo está intimamente relacionada ao conteúdo de carbono orgânico. O mesmo foi verificado por Emamgolizadeh et al. (2015) que relataram que a matéria orgânica do solo tem o maior efeito sobre a CTC do solo.

Dessa forma, quando a matéria orgânica do solo é mineralizada e transforma o material orgânico em substâncias orgânicas e mineralizadas, há aumento das cargas negativas do solo e elevação do pH. Essa ocorrência de sítios negativamente carregados demonstra a habilidade da matéria orgânica reter cátions no complexo sortivo do solo, cuja contribuição pode atingir até 80% da CTC do solo (MORETI et al., 2007).

O efeito na CTC a partir da matéria orgânica do solo também pode ser resultante da utilização de cama de frango, uma vez que esta promove seu incremento no solo a partir da decomposição ao longo do tempo, sendo que Santos et al. (2014) ao avaliar a adubação antecipada na aveia com cama de frango até a dose de 7,5 Mg ha⁻¹ verificaram aumento da CTC com a aplicação do material, contudo, esse aumento foi verificado apenas até a profundidade de 0,05 m e os autores atribuíram esse resultado ao aumento do teor de matéria orgânica nessa camada.

Oliveira (2019) ao avaliar aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos e cama de frango durante 4 anos em um Latossolo Vermelho distroférrico muito argiloso verificou que na camada superficial do solo (0,00-0,10 m) a utilização dos adubos orgânicos promoveu correlação entre a CTC e o conteúdo de carbono orgânico total do solo, que representa o carbono mais lignificado e de difícil decomposição, porém com a presença de hidroxilas em sua molécula. Segundo o autor, a correlação positiva verificada ocorreu porque a decomposição dos

adubos orgânicos, bem como da palhada das plantas cultivadas, libera carboxilas e macronutrientes no solo, aumentando as concentrações de cargas variáveis.

Esse aumento da CTC pode ocorrer pela adição direta de carboxila/hidroxila presente nos materiais orgânicos como também pela neutralização do H^+ e do Al^{3+} (LOURENZI et al., 2013). Esse aumento das carboxilas/hidroxilas também pode ter ocorrido pelo estímulo da atividade microbiana ocasionada pela adição de resíduos orgânicos ao solo (BALOTA et al., 2014). Essas questões podem ter contribuído para o aumento das cargas variáveis no solo, aumentando também a CTC.

Como na camada de 0,10-0,20 m a mudança da CTC foi menos evidente do que na camada superficial, é possível que essa alteração menor tenha ocorrido também em função do conteúdo de carbono orgânico do solo, porém, não necessariamente do que foi adicionado ao solo via cama de frango ou decomposição da palhada dos consórcios, visto que para que haja incremento significativo no teor de matéria orgânica e de carbono orgânico nessa camada seria necessário maior período de tempo. É possível que isso tenha ocorrido a partir do carbono oriundo de outras fontes, como das raízes e seus exsudatos (OLIVEIRA, 2019).

Em trabalho realizado por Toscani e Campos (2017) a fim de verificar possíveis alterações na mineralogia do solo com a utilização de remineralizadores de solo, dentre eles o pó de basalto, verificaram que a utilização de basalto proporcionou a introdução de minerais como albita, augita, anortita, vermiculita e montmorilonita, contudo, é importante salientar que os autores utilizaram doses extremamente elevadas (acima de 200 Mg ha⁻¹ do produto), além de realizar o revolvimento do solo para a incorporação do material, o que pode ter influenciado na obtenção desses resultados, uma vez que o experimento foi conduzido em um curto período de tempo (13 meses).

Entretanto, como os próprios autores salientaram, essa mineralogia verificada é complexa e tem grande importância, pois indica uma possível disponibilização de uma gama variada de macro e micronutrientes, além de que, ao longo do tempo é provável que haja a neoformação de minerais do tipo 2:1, contribuindo assim para o aumento da CTC do solo.

O aumento da CTC após 1 a 2 anos da aplicação de remineralizadores tem sido relatada na literatura como um efeito secundário da utilização do material (GILLMAN et al., 2001; RESENDE et al., 2006; SILVA et al., 2017), pois como a CTC é estimada pela soma dos principais cátions trocáveis ligados ao complexo de troca dos coloides orgânicos e inorgânicos do solo, a dissolução parcial do remineralizador presente no solo durante as coletas pode acabar superestimando o valor da CTC. Contudo, o desenvolvimento de CTC com a aplicação de remineralizador também pode ocorrer através da formação de novas fases minerais secundárias

e/ou ao desenvolvimento de cargas na superfície dos grãos do remineralizador, devido à dissolução incongruente que gera valências insatisfeitas nos oxigênios da estrutura mineral, a partir da migração de cátions para a solução (SANTOS, 2020).

Contudo, para o presente trabalho, a contribuição do remineralizador basáltico na elevação da CTC do solo tende a ser improvável, pelas próprias características de solubilização do material e pela própria quantidade de material aplicado, que para um período de curto a médio prazo dificilmente tenha ocasionado alterações morfológicas significativas.

Ao se considerar que não houve uma diferenciação marcante na CTC do solo quando se compara a presença e a ausência do remineralizador, a hipótese de que alterações mineralógicas provenientes do material tenham ocorrido em nível suficiente para elevar a CTC do solo torna-se mais improvável, considerando o período de tempo avaliado nesse trabalho. Porém, isso não impede de que alterações ocorram ao longo de períodos maiores de tempo de incubação e que venham a contribuir para mudanças positivas na CTC do solo de forma efetiva.

Diante disso, possivelmente o aumento verificado na CTC do solo no presente trabalho tenha ocorrido pelas próprias alterações verificadas no aumento do pH do solo que ocorreu em grande parte dos tratamentos, bem como pela utilização de fontes de material orgânico, como os consórcios de plantas de cobertura e a cama de frango, que podem atuar aumentando as cargas variáveis do solo.

3.2 TEOR DE FÓSFORO

Houve interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação em ambas camadas avaliadas. É possível verificar que essa variável do solo foi a que mais oscilou conforme as combinações de tratamentos utilizados, sem apresentar um padrão para tratamentos semelhantes. Os teores de P seguiram comportamentos explicados por equações lineares e por equações polinomiais de 2º grau (Figura 7).

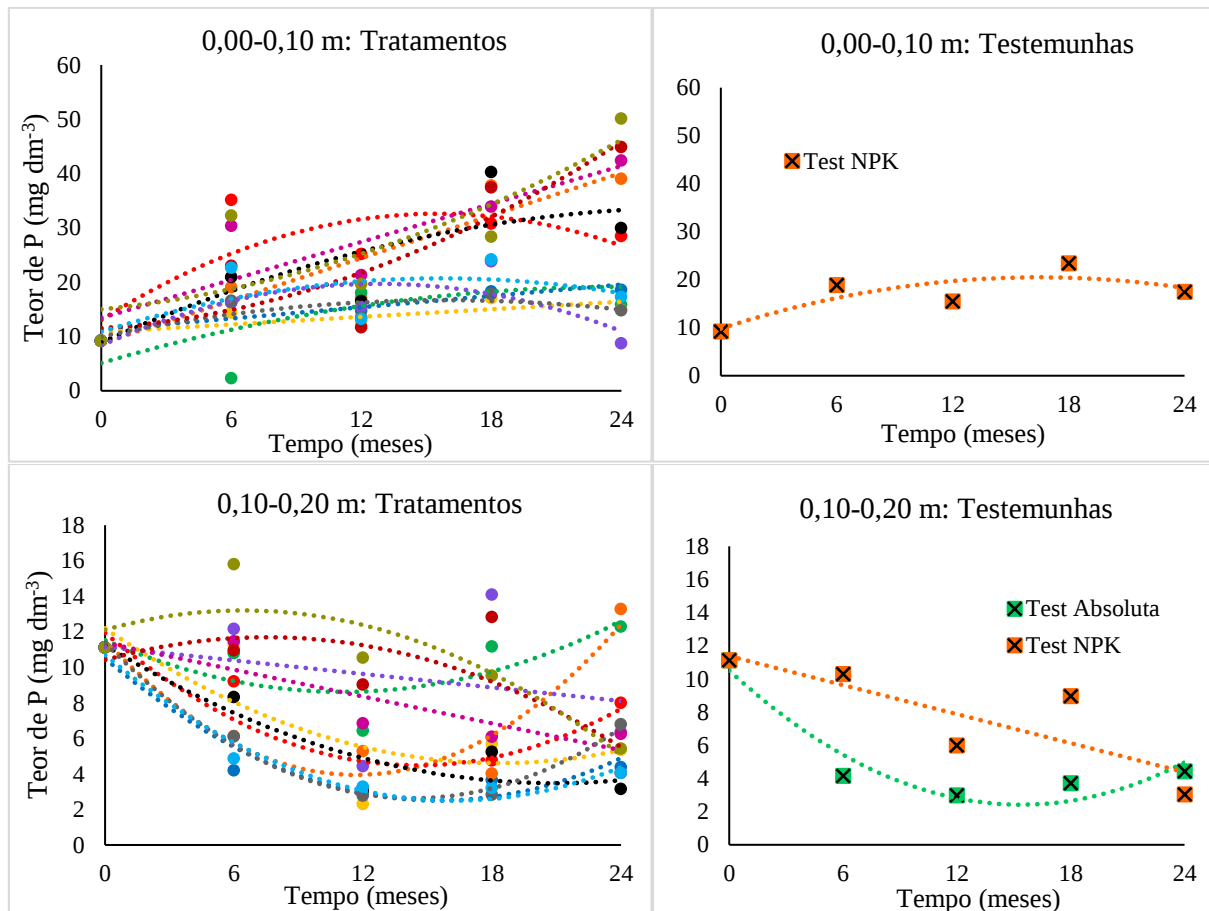


Figura 7. Teor de fósforo (mg dm^{-3}) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

Com base nas equações de regressão (Tabela 9) é possível observar que para as equações lineares na camada de 0,00-0,10 m os maiores teores de P até os 24 meses de avaliação foram obtidos pelo tratamento sem remineralizador/com cama/ave+nab com $40,12 \text{ mg dm}^{-3}$ e pelo tratamento com remineralizador/com cama/tre+erv com $41,41 \text{ mg dm}^{-3}$.

Considerando as equações de 2º grau na camada de 0,00-0,10 m, observa-se que os maiores teores de P foram obtidos com o tratamento com remineralizador/com cama/ave+nab aos 15,5 meses com teor de $32,60 \text{ mg dm}^{-3}$ e com o tratamento sem remineralizador/com cama/tre+erv aos 28 meses com teor de $33,78 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 9).

Dessa forma, é possível estabelecer que os tratamentos mantiveram os teores de P em níveis elevados e que o tempo de incubação apresentou um efeito importante no comportamento

do P, sobretudo quando foi utilizado o remineralizador basáltico em associação com a cama de frango e com os consórcios de plantas de cobertura.

Tabela 9. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de P) para os tratamentos apresentados na figura 7, de acordo com a camada de solo avaliada

Tratamento	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m	
	X (meses)	Y (mg dm ⁻³)	X (meses)	Y (mg dm ⁻³)
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	$*Y = 11,23 + 0,347x$ X = 24 meses; Y = 19,56 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,75$	$*Y = 10,509 - 1,0318x + 0,0332x^2$ X = 15,5 meses; Y = 2,49 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,92$
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	$*Y = 8,768 + 1,3062x$ X = 24 meses; Y = 40,12 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,87$	$*Y = 11,533 - 1,3005x + 0,0557x^2$ X = 11,7 meses; Y = 3,94 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,88$
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	$*Y = 5,116 + 1,1675x - 0,0243x^2$ X = 24 meses; Y = 19,14 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,78$	$*Y = 11,528 - 0,5267x + 0,0238x^2$ X = 11,1 meses; Y = 8,61 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,54$
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	$*Y = 13,049 + 2,5199x - 0,0812x^2$ X = 15,5 meses; Y = 32,60 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,60$	$*Y = 11,949 - 1,0288x + 0,0354x^2$ X = 14,5 meses; Y = 4,47 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,82$
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	$*Y = 10,824 + 0,233x$ X = 24 meses; Y = 16,42 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,57$	$*Y = 12,199 - 0,8285x + 0,0226x^2$ X = 13,3 meses; Y = 5,18 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,63$
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	$*Y = 8,9211 + 1,7725x - 0,0316x^2$ X = 28 meses; Y = 33,78 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,67$	$*Y = 11,251 - 0,7427x + 0,0177x^2$ X = 21 meses; Y = 3,46 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,85$
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	$*Y = 8,346 + 1,776x - 0,0694x^2$ X = 12,8 meses; Y = 19,71 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,61$	$*Y = 11,152 - 0,127x$ X = 24 meses; Y = 8,10 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,09$
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	$*Y = 13,43 + 1,1657x$ X = 24 meses; Y = 41,41 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,76$	$*Y = 11,376 - 0,2518x$ X = 24 meses; Y = 5,33 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,78$
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 9,968 + 0,8435x - 0,0265x^2$ X = 16 meses; Y = 16,68 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,64$	$*Y = 11,359 - 1,2155x + 0,0423x^2$ X = 14,4 meses; Y = 2,63 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,99$
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 11,544 + 0,2674x + 0,0484x^2$ X = 2,8 meses; Y = 12,67 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,79$	$*Y = 10,405 + 0,3433x - 0,0228x^2$ X = 7,5 meses; Y = 11,70 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,54$
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 10,858 + 1,2557x - 0,04x^2$ X = 15,7 meses; Y = 20,71 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,38$	$*Y = 10,707 - 1,0113x + 0,0312x^2$ X = 16,2 meses; Y = 2,51 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,97$
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	$*Y = 15 + 0,4025x + 0,0374x^2$ X = 5,4 meses; Y = 18,26 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,68$	$*Y = 12,109 + 0,34x - 0,0264x^2$ X = 6,4 meses; Y = 13,20 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,80$
Testemunha Absoluta	Y = ns		$*Y = 10,514 - 1,0529x + 0,0342x^2$ X = 15,4 meses; Y = 2,41 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,92$
Testemunha NPK	$*Y = 9,8191 + 1,2961x - 0,0393x^2$ X = 16,5 meses; Y = 20,51 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,68$	$*Y = 11,382 - 0,2918x$ X = 24 meses; Y = 4,38 mg dm ⁻³	$R^2 = 0,69$

Médias (por grupo de associação)								
Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m			
	X (meses)		Y (mg dm ⁻³)		X (meses)		Y (mg dm ⁻³)	
	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	21,3	-	17,55	-	-	14,4	-	3,43
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	26	2,8	36,95	12,67	7,5	16,4	11,70	3,70
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	17,5	-	19,85	-	-	17,1	-	6,41
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	19,8	5,4	37,01	18,26	6,4	19,2	13,20	4,90
Testemunha Absoluta	-	-	-	-	-	15,4	-	2,41
Testemunha NPK	16,5	-	20,51	-	-	24	-	4,38

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro. ns: equação não significativa.

Esses resultados sugerem que a ausência de significância na testemunha absoluta, além de ser um efeito da ausência de adição de fontes de P ao solo, pode estar relacionado ao poder tampão do solo. Solos argilosos apresentam maior efeito tampão e, conseqüentemente, maior retenção desse nutriente nos coloides, o que acaba dando mais resistência ao solo em liberar o

P para a solução do solo (BRADY; WEIL, 2013; HUBNER, 2023), sobretudo quando não são utilizadas estratégias de manejo da fertilidade do solo.

Ao se analisar as médias obtidas para cada grupo de tratamentos, a fim de se ter uma visão mais ampla dos resultados, é possível verificar que a associação sem remineralizador/com cama/consórcio e a associação com remineralizador/com cama/consórcio apresentaram valores máximos semelhantes de P no solo (36,95 e 37,01 mg dm⁻³, respectivamente), contudo, é possível destacar que quando houve a adição de remineralizador o tempo necessário para a obtenção do maior valor de P foi menor (19,8 meses) do que o necessário na associação sem remineralizador (26 meses) (Tabela 9). Esses valores demonstram que a adição do remineralizador juntamente com a cama de frango e o cultivo dos consórcios reduziu o tempo para obtenção do maior teor de P extraído em 6 meses (24%).

Além disso, quando o remineralizador foi associado apenas aos consórcios (com remineralizador/sem cama/ consórcio) o valor máximo de P foi menor (19,85 mg dm⁻³) e semelhante ao obtido no tratamento sem o remineralizador (sem remineralizador/sem cama/ consórcio = 17,55 mg dm⁻³) e ao obtido no tratamento com a adubação NPK (20,51 mg dm⁻³) (Tabela 9). Isso pode indicar que a associação do remineralizador somente com os consórcios de plantas promoveu uma menor liberação de P do que quando o material foi associado também com a cama de frango; contudo, mesmo assim o valor médio obtido foi muito semelhante ao verificado na testemunha com adubação NPK.

Quando se analisa cada um dos tratamentos verifica-se que todos ou foram semelhantes ou apresentaram valores superiores ao obtido na testemunha com adubação NPK, indicando que a utilização seja do remineralizador, da cama de frango ou dos consórcios pode ser utilizada como uma ferramenta de manejo do P no solo de forma tão eficiente quanto a adubação NPK. É possível também que nos tratamentos onde houve maior extração de P tenha ocorrido a liberação de parte do P que estava fortemente adsorvido aos colóides do solo para a solução e ficando disponível para as plantas, portanto, aumentando a ciclagem do nutriente no sistema.

Como nos resíduos vegetais existe uma alta concentração de P solúvel em água e a maior parte do P é encontrada no interior dos vacúolos, na forma mineral, tendo alta capacidade de se solubilizar em água (PACHECO et al., 2013), o P possui uma disponibilidade rápida da palhada dos resíduos vegetais. Diante disso, esse aumento pode ser proveniente do fósforo solúvel presente nos resíduos das plantas de cobertura.

Michelon et al. (2019) também verificaram maior disponibilidade de P no solo cultivado com consórcios que envolviam aveia-preta + nabo-forrageiro + ervilhaca.

Observaram também que as mesmas plantas quando cultivadas em monocultivo também apresentaram valores significativos do nutriente no solo.

Os teores mais elevados de P nos tratamentos também podem estar ligados com a capacidade das plantas em liberar ao solo ácidos orgânicos a partir de suas raízes, bem como a partir da decomposição de seus resíduos; ácidos orgânicos também são liberados pela decomposição da cama de frango e pela atividade de microrganismos associados a ela. Esses ácidos orgânicos podem exercer influência sobre a disponibilidade de P no solo, uma vez que interagem com a fase sólida e competem com o P pelos sítios de adsorção (PAVINATO; ROSOLEM, 2008) e/ou podem bloquear previamente esses sítios (ANDRADE et al., 2003), além de ocasionarem maior complexação com os íons de Al e Fe, reduzindo a chance de precipitação do P com esses elementos (GUPPY et al., 2005) e mantendo o nutriente em formas mais livres na solução do solo.

Isso ocorre porque os grupos funcionais dos ácidos orgânicos são dependentes do pH, fazendo com que grande parte desses ácidos orgânicos tenham caráter aniônico. Dessa forma, como apresentam um valor de ponto de carga zero (PCZ) baixo (em torno de 3,5), em pH superior a esse valor ocorre o predomínio de cargas negativas nesses grupos devido à dissociação do H^+ e formação de água. Isso resulta na competição entre esses ácidos orgânicos e os nutrientes aniônicos pelos sítios de adsorção do solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Diante disso, como a fixação do P no solo não é um processo totalmente irreversível, grande parte do fósforo fixado pode voltar a ser disponível para as plantas ao longo do tempo em sistemas de produção que utilizam o cultivo de diferentes plantas (CHAVES, 2010), bem como façam a utilização da cama de frango no manejo da fertilidade do solo.

Dessa forma, a aplicação constante de esterco animal, a exsudação radicular e o metabolismo dos microrganismos, como fontes de reposição de ácidos orgânicos no solo, podem manter o processo de bloqueio dos sítios de adsorção de P de maneira mais contínua. Contudo, a adsorção de P pode ser somente retardada, mas não inibida pela presença de ácidos orgânicos e esse retardamento pode melhorar a absorção e aproveitamento do P pelas plantas ao longo dos ciclos de cultivo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Em trabalho realizado por Souza e Lobato (2003) foi verificado que em uma área cultivada exclusivamente com culturas anuais por 22 anos a recuperação de P foi de 44%, e quando se utilizou a diversificação do sistema atingiu-se uma recuperação de P de 85%.

Lima (2011) ao avaliar compostos orgânicos formulados com resíduos ricos em Si (micaxisto e serpentinita) sobre a disponibilidade de P em amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura argilo-arenosa, verificou que o P aumentou conforme a dose do

composto, evidenciando uma possível redução da precipitação/adsorção de P pelo solo. O autor constatou correlação positiva entre o teor de P e o de carbono total no solo, indicando ação direta das substâncias húmicas na formação de complexos organometálicos com os íons Fe e Al em várias faixas de pH, que podem impedir a precipitação do fosfato com tais íons e/ou bloquear os sítios de adsorção de fosfato no solo; aumentando a disponibilidade desse elemento.

Além disso, a cama de frango utilizada também atuou como uma fonte de P ao solo, visto que o conteúdo de P_2O_5 era de $22,80 \text{ g kg}^{-1}$ no material utilizado no cultivo do ano de 2021 e de $42,45 \text{ g kg}^{-1}$ no material utilizado no cultivo do ano de 2022 (Tabela 3), ou seja, ao total foram aplicados $136,80 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 na safra 2021 e $254,70 \text{ kg ha}^{-1}$ na safra 2022. Dessa forma, o comportamento do P nos tratamentos que receberam aplicação de cama de frango também se deve às quantidades do nutriente que o material liberou ao solo.

Vale salientar que o aumento do teor de P no solo com a adição de materiais orgânicos (resíduos vegetais e cama de frango) pode ser atribuída ao fato de ocorrer maior mineralização de P do material orgânico adicionado e não da inibição competitiva entre o carbono orgânico solúvel e o P pelos sítios de adsorção, visto que parte do P liberado da matéria orgânica também poderia ficar retida nos sítios de adsorção, dando a impressão que a adsorção de P reduziu, mas na verdade ocorreu o aumento da quantidade total de P no meio (ERICH et al., 2002).

Outro fator que pode ter contribuído para a obtenção de valores elevados nos tratamentos com a utilização do remineralizador é que esse material apresentou 51,39% de óxidos de silício em sua composição e com a liberação do ânion silício na solução do solo ocorre a redução da adsorção do ânion fosfato, pois o silício compete pelos mesmos sítios de adsorção do solo (GILLMAN et al., 2002). Dessa forma, o silício pode ter saturado os locais onde o P poderia ser adsorvido, mantendo-o disponível para a extração.

Esses resultados são corroborados por Sandim et al. (2014). Os autores ao avaliarem a influência da aplicação de silicato na disponibilidade de P verificaram o maior teor de P nos tratamentos com uso de silicatos e atribuíram esse efeito a soma de dois fatores: o poder de alcalinização do Si e à competição pelo mesmo sítio de adsorção entre o Si e o P.

Conceição et al. (2022) também verificaram aumento no teor de P com a utilização de remineralizador basáltico de $3,9 \text{ mg dm}^{-3}$ para 25 mg dm^{-3} com a aplicação de 8 Mg ha^{-1} . Os autores atribuíram esse aumento à composição mineralógica do basalto, tanto à presença de apatita quanto à disponibilidade de P pela liberação de Si.

Lima (2011) verificou correlação positiva entre os teores de Si e P no solo, indicando que o Si pode ter influenciado a dinâmica de P no solo. O autor sugere que o Si contido no composto utilizado resultante da mistura de remineralizadores ricos em Si (micaxisto e

serpentinita) com bagaço de cana e esterco de galinhas poedeiras, provavelmente promoveu o bloqueio dos sítios de adsorção de fosfatos; assim como as substâncias húmicas presentes nesse composto.

A redução do período de tempo que ocorreu para a obtenção de valores semelhantes quando se utilizou o remineralizador associado à cama de frango e aos consórcios em relação à não utilização do remineralizador pode ter ocorrido pelo fato de que as plantas são capazes de liberar compostos e ácidos orgânicos a partir da decomposição de seus resíduos e da liberação de exsudatos radiculares, ocasionando alterações químicas, sobretudo na região da rizosfera. Esses compostos tem sido reconhecidos como promotores do intemperismo de silicatos através do aumento das taxas de hidrólise dos minerais (LI et al., 2014).

Portanto, existe a possibilidade de ácidos orgânicos provenientes das plantas de cobertura terem agido sobre as partículas do remineralizador, solubilizando-o e liberando parte das frações de Si, que competiu com os sítios de adsorção de P no solo e o manteve disponível por mais tempo na solução, e das pequenas frações de fosfato presente na rocha (0,27% de P_2O_5).

Embora o teor de P tenha aumentado de forma expressiva no solo, observa-se que alguns tratamentos apresentaram redução no teor de P a partir dos pontos de máxima (Figura 7), o que pode ser comum, uma vez que pela adição de fontes de P em superfície tem-se a saturação dos sítios de maior afinidade por fósforo (SANTOS et al., 2008), reduzindo a liberação do nutriente. Isso também pode ter ocorrido em função das próprias condições dos solos com predomínio de óxidos de Fe e Al na fração argila, favorecendo a fixação do P (ALOVISI et al., 2017).

Além disso, a baixa solubilidade do remineralizador tende a interferir na liberação no nutriente. Contudo, essa solubilidade lenta também é uma característica importante na utilização do remineralizador, por permitir que ocorra um efeito residual após a aplicação desse produto, o que reduziria a demanda por aplicação de fertilizantes por determinados períodos (HARLEY; GILKES, 2000).

Na camada de 0,10-0,20 m os tratamentos apresentaram comportamentos de redução linear ou redução explicada por equações polinomiais de 2º grau com posterior aumento nos teores de P, e apenas os tratamentos com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv e sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv apresentaram um pequeno aumento inicial nos teores de P, mas que posteriormente reduziram ao longo do tempo de avaliação (Figura 7 e Tabela 9).

Os menores teores de P nessa camada foram obtidos com a testemunha absoluta (2,41 mg dm⁻³) aos 15,4 meses; com o tratamento sem remineralizador/sem cama/ave+nab (2,49 mg dm⁻³) aos 15,5 meses de avaliação; com o tratamento com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv (2,51 mg dm⁻³) aos 16,2 meses; e com o tratamento sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv (2,63 mg dm⁻³) aos 14,4 meses (Tabela 9).

Os tratamentos com remineralizador/com cama/mix 3 e sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv apresentaram um leve aumento inicial nos teores extraídos de P até os 6,4 meses (13,20 mg dm⁻³) e até os 7,5 meses (11,70 mg dm⁻³), respectivamente (Tabela 9); contudo, após esse ponto os teores extraídos apenas reduziram, atingindo valores de 5,06 mg dm⁻³ e 5,51 mg dm⁻³, respectivamente, até os 24 meses.

Esses resultados podem representar que o breve aumento do teor de P nessa camada seja resultante da liberação de ácidos orgânicos pelas raízes das plantas que competiram com os sítios de ligação com o P (como explicado anteriormente), fazendo com que o nutriente permanecesse disponível na solução do solo para a absorção das plantas, porém, após o manejo das plantas o nutriente foi liberado pela decomposição da fitomassa na camada superficial do solo, o que justificaria a redução dos teores de P após o período que coincide com o manejo dos consórcios no primeiro ano de cultivo.

A redução dos teores de P na camada de 0,10-0,20 m também era esperado, visto que em sistemas de plantio direto é comum haver o acúmulo de nutrientes na superfície, especialmente de P que possui baixa mobilidade no solo (SOUZA; ALVES 2003). Isso ocorre porque há acúmulo no tecido das plantas cultivadas, com posterior decomposição e liberação desse nutriente nas camadas superficiais (PAVINATO; ROSOLEM, 2008); além de quantidades do nutriente que são absorvidas pelas culturas do milho e da soja, translocadas para os grãos e exportadas com a colheita, não tendo o retorno ao solo.

Além disso, o basalto é um produto com baixa solubilidade a curto prazo e baixa mobilidade no perfil do solo, contribuindo para que os teores mais elevados ocorram em superfície, enquanto há redução dos teores em profundidades maiores.

3.3 TEOR DE POTÁSSIO

Houve interação significativa entre tratamentos e tempos de avaliação para os teores de K nas duas camadas de solo. Os resultados foram explicados por equações polinomiais de 2º grau e por equações lineares. Na camada até 0,10 m os tratamentos apresentaram

comportamento semelhante, com o teor de K aumentando conforme o tempo de avaliação, até atingir teor máximo em torno de 20 meses após o início do experimento (Figura 8).

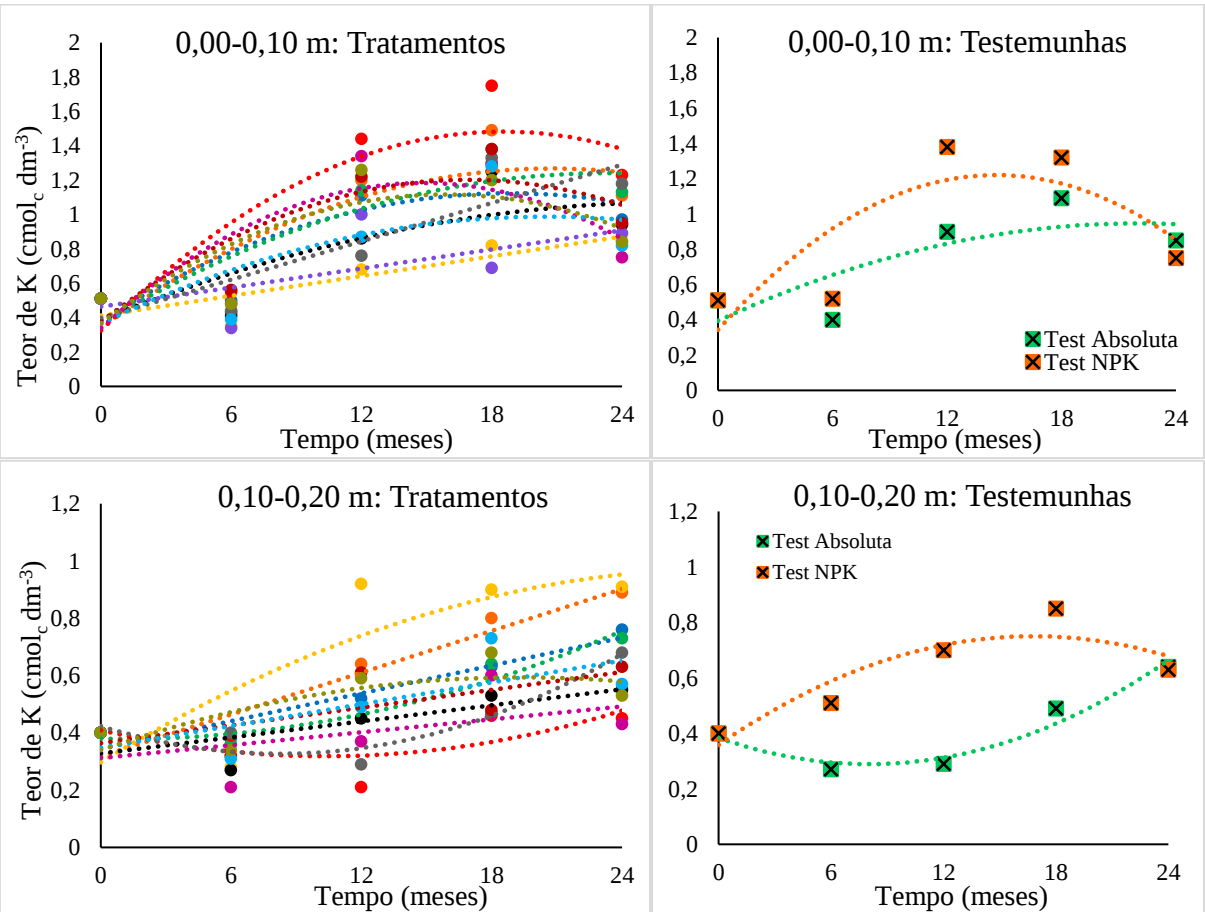


Figura 8. Teor de potássio (cmol_c dm⁻³) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função da associação entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador, Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

É possível estabelecer que na camada até 0,10 m os menores tempos para que se atingisse os maiores teores de K foram obtidos quando se utilizou a combinação tripla do remineralizador com a cama de frango e com os consórcios de plantas. Em média, foram necessários 16,4 meses para a obtenção de 1,26 cmol_c dm⁻³ de K quando o remineralizador foi associado a cama de frango e aos consórcios, enquanto que quando houve apenas associação com a cama de frango ou apenas com algum dos consórcios o tempo necessário foi em média de 22 meses para atingir um teor de 1,11 cmol_c dm⁻³ de K. Isso representa uma redução de 5,6 meses (25%) no tempo de solubilização para se ter um teor de K 13,5% superior (Tabela 10).

Tabela 10. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de K) para os tratamentos apresentados na figura 8

Tratamento	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	*Y = 0,384 + 0,0785x - 0,0021x ² $R^2 = 0,73$ X = 18,7 meses; Y = 1,12 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,344 + 0,0162x $R^2 = 0,92$ X = 24 meses; Y = 0,73 cmol _c dm ⁻³
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 0,3417 + 0,0891x - 0,0021x ² $R^2 = 0,70$ X = 21,2 meses; Y = 1,29 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,318 + 0,0243x $R^2 = 0,88$ X = 24 meses; Y = 0,90 cmol _c dm ⁻³
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	*Y = 0,3643 + 0,0751x - 0,0016x ² $R^2 = 0,74$ X = 23,5 meses; Y = 1,25 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,3794 - 0,0015x + 0,0007x ² $R^2 = 0,95$ X = 1,1 meses; Y = 0,38 cmol _c dm ⁻³
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 0,3251 + 0,125x - 0,0034x ² $R^2 = 0,75$ X = 18,4 meses; Y = 1,47 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,2969 + 0,0464x - 0,0008x ² $R^2 = 0,71$ X = 29 meses; Y = 0,97 cmol _c dm ⁻³
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	*Y = 0,412 + 0,0192x $R^2 = 0,74$ X = 24 meses; Y = 0,87 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,4094 - 0,0176x + 0,0009x ² $R^2 = 0,42$ X = 9,8 meses; Y = 0,32 cmol _c dm ⁻³
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 0,3854 + 0,0512x - 0,001x ² $R^2 = 0,66$ X = 25,6 meses; Y = 1,04 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,328 + 0,0093x $R^2 = 0,62$ X = 24 meses; Y = 0,55 cmol _c dm ⁻³
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	*Y = 0,464 + 0,0185x $R^2 = 0,43$ X = 24 meses; Y = 0,91 cmol _c dm ⁻³	Y = ns
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 0,3389 + 0,114x - 0,0038x ² $R^2 = 0,62$ X = 15 meses; Y = 1,19 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,312 + 0,0075x $R^2 = 0,26$ X = 24 meses; Y = 0,49 cmol _c dm ⁻³
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 0,398 + 0,0372x $R^2 = 0,79$ X = 24 meses; Y = 1,29 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,4234 + 0,0233x + 0,0014x ² $R^2 = 0,90$ X = 8,3 meses; Y = 0,33 cmol _c dm ⁻³
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 0,3754 + 0,0979x - 0,0029x ² $R^2 = 0,75$ X = 16,9 meses; Y = 1,20 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,364 + 0,0103x $R^2 = 0,54$ X = 24 meses; Y = 0,61 cmol _c dm ⁻³
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 0,3649 + 0,0609x - 0,0015x ² $R^2 = 0,55$ X = 20,3 meses; Y = 0,98 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,348 + 0,0127x $R^2 = 0,56$ X = 24 meses; Y = 0,65 cmol _c dm ⁻³
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 0,3677 + 0,0944x - 0,003x ² $R^2 = 0,65$ X = 15,7 meses; Y = 1,11 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,3394 + 0,0262x - 0,0007x ² $R^2 = 0,59$ X = 18,7 meses; Y = 0,58 cmol _c dm ⁻³
Testemunha Absoluta	*Y = 0,3946 + 0,05x - 0,0011x ² $R^2 = 0,65$ X = 25 meses; Y = 0,96 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,3837 - 0,0236x + 0,0015x ² $R^2 = 0,95$ X = 7,9 meses; Y = 0,29 cmol _c dm ⁻³
Testemunha NPK	*Y = 0,3429 + 0,1204x - 0,0041x ² $R^2 = 0,65$ X = 14,7 meses; Y = 1,23 cmol _c dm ⁻³	*Y = 0,358 + 0,0467x - 0,0014x ² $R^2 = 0,83$ X = 16,7 meses; Y = 0,75 cmol _c dm ⁻³

Médias (por grupo de associação)

Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m			
	X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)		X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)	
	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	22,2	-	1,09	-	24	9,1	0,73	0,32
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	21,2	-	1,18	-	24	-	0,69	-
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	22,6	-	1,05	-	24	1,1	0,65	0,38
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	16,4	-	1,26	-	23,9	-	0,68	-
Testemunha Absoluta	25	-	0,96	-	-	7,9	-	0,29
Testemunha NPK	14,7	-	1,23	-	16,7	-	0,75	-

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro. ns: equação não significativa.

Para a associação com remineralizador/com cama/ave+nab o maior teor de K (1,47 cmol_c dm⁻³) foi obtido aos 18,4 meses. Para a associação com remineralizador/com cama/tre+erv o maior teor (1,19 cmol_c dm⁻³) foi obtido aos 15 meses e para a associação com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv o maior teor (1,11 cmol_c dm⁻³) foi obtido aos 15,7 meses (Tabela 10).

Já para a camada abaixo dos 0,10 m o comportamento do K ao longo do tempo alterou conforme cada tratamento utilizado (Figura 8), provavelmente em função da própria dinâmica

e alta mobilidade do nutriente no perfil do solo. Nessa camada os teores de K reduziram, o que já era esperado, pois há uma tendência de acúmulo de K nas camadas superficiais devido à ausência de mobilização do solo em semeadura direta, que leva ao acúmulo de resíduos vegetais em superfície. Nessa camada é possível observar que os maiores teores de K foram obtidos com a associação com remineralizador/com cama/ave+nab, com teor de $0,97 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aos 29 meses de avaliação (Figura 8; Tabela 10).

Mesmo que a tendência tenha sido de redução dos teores de K conforme o aumento da profundidade do solo, esses teores continuaram sendo classificados como teores muito altos ($>0,45 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2019). Isso indica que mesmo em profundidades maiores que 0,10 m ainda houve um incremento e manutenção do K inicialmente presente no solo nessa camada, que era de $0,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Esse incremento foi de 142% aos 29 meses de avaliação para o tratamento supracitado.

Isso indica que a associação entre as fontes de nutrientes (cama de frango e remineralizador) e os consórcios de plantas de cobertura promoveram incrementos consideráveis nos teores de K e que permaneceu na camada por maior período de tempo sem ser lixiviado.

Considerando os tempos com maiores teores de K na camada de 0,00-0,10 m, é possível observar que a associação com remineralizador/com cama/ave+nab proporcionou incremento médio no teor de K de 188,24% em relação ao teor inicial (média de $0,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); quando essa associação envolveu o consórcio de tremoço + ervilha o incremento médio foi de 133,33% e quando houve associação com o consórcio de aveia + nabo + tremoço + ervilha este incremento foi em média de 117,65%.

A disponibilidade de K nesses tratamentos foi muito alta, evidenciando que as associações cama de frango, planta e remineralizador foram eficientes em elevar os teores de K mesmo em uma área cujo teor já se encontrava elevado; uma vez que a cama de frango utilizada apresentava alta concentração de K_2O (capacidade de fornecer 89,52 kg de K_2O na primeira aplicação e 160,80 kg na segunda aplicação) e o remineralizador tinha a capacidade de fornecer até 94,40 kg de K_2O (dependente de sua solubilização), além de que as plantas de cobertura podem atuar na ciclagem do K de camadas mais profundas.

Esses resultados demonstram a importância de se realizar a aplicação antecipada do remineralizador e sempre em associação a fatores biológicos do intemperismo, pois, na maioria dos minerais silicáticos o K está na forma insolúvel, apresentando certa dificuldade de liberação

ao solo quando utilizado como prática isolada no manejo da fertilidade do solo (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004; ALOVISI et al., 2017).

Quanto às testemunhas, ambas apresentaram comportamento explicado por uma equação polinomial de 2º grau em ambas camadas do solo. Na camada de 0,00-0,10 m a testemunha com adubação NPK apresentou o maior teor de K aos 14,7 meses ($1,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto que na testemunha absoluta o maior teor de K ($0,96 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi obtido aos 25 meses (Figura 8). Na camada de 0,10-0,20 m a testemunha com adubação NPK obteve os maiores teores de K aos 16,7 meses ($0,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto que na testemunha absoluta aos 7,9 meses foi obtido o menor valor de K ($0,29 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Embora as testemunhas não tenham sido cultivadas com plantas de cobertura, houve alta incidência de plantas espontâneas nessas áreas devido à baixa cobertura do solo, que após o controle sofreram o processo de decomposição dos resíduos, liberando os nutrientes constituintes, como o K. Dessa forma, o comportamento de aumento dos teores de K na testemunha absoluta ao longo do tempo podem decorrer da ciclagem que essas plantas também realizam (FAVERO et al., 2000).

Embora a testemunha com adubação NPK tenha recebido duas aplicações de fertilizante formulado (uma na semeadura do milho e outra na semeadura da soja), os maiores teores de K foram obtidos aos 14,5 meses, correspondendo a cerca de 90 dias após a colheita da cultura do milho. Após esse ponto o teor de K reduziu nessa camada, mesmo que ainda tenha ocorrido mais uma aplicação de fertilizante após os 18 meses de avaliação.

Aos 14,5 meses foi observado o maior teor de K para a camada de 0,00-0,10 m, possivelmente pela liberação de K dos resíduos da cultura do milho após a colheita, uma vez que esse é o segundo nutriente absorvido em maior quantidade pelas plantas de milho que chegam a acumular cerca de 314 kg ha^{-1} de K em sua parte aérea (VON PINHO et al., 2009) e cerca de 70 a 80% desse valor retorna ao solo através da palhada remanescente (TAVEIRA et al., 2021). Como o K não está associado a nenhum componente estrutural do tecido vegetal (COSTA et al., 2009), à medida que o material inicia o processo de decomposição, a concentração do elemento reduz rapidamente na palhada por ser facilmente lavado da fitomassa pela água da chuva (CALONEGO et al., 2012).

Contudo, o mesmo fato não ocorreu após a segunda aplicação de fertilizante formulado com a semeadura da soja, visto que o teor de K no solo apenas reduziu após a colheita do milho. Provavelmente, pelo fato de parte do fertilizante químico aplicado ser convertido em formas inicialmente não-trocáveis no solo e a passagem do K não-trocável para formas trocáveis ser rápida, o elemento ficou sujeito à lixiviação no perfil do solo (WERLE et al., 2008). Além disso,

o complexo de troca do solo pode ficar saturado quando a adubação é realizada no sulco de semeadura, podendo provocar maiores perdas por lixiviação (ROSOLEM et al., 2006).

Vale destacar que considerável parte do K absorvido pelas culturas é exportado na forma de grãos, não tendo o seu retorno ao solo após a colheita, o que também contribui para menores teores de K no solo após a colheita da cultura da soja, visto que é uma cultura que acumula grandes quantidades de K nos grãos.

Ao comparar os tratamentos com as testemunhas, foi observado certa semelhança em relação ao comportamento do teor de K ao longo do tempo, uma vez que inicialmente a área já apresentava teores altos e muito altos no solo e isso pode ter influenciado a dinâmica e a liberação desse nutriente. A disponibilização tende a ser intensificada pela menor concentração de elementos na solução do solo, enquanto que em solos com teores elevados de determinado elemento em solução a velocidade de solubilização e/ou liberação desse elemento será reduzida (BATISTA et al., 2018).

Contudo, é possível verificar um certo aumento no teor de K no solo e maior efeito residual quando foram utilizados os tratamentos em relação à testemunha absoluta. Uma vez que o teor inicial de K era elevado e esse é um elemento altamente móvel no perfil do solo, sendo facilmente perdido por lixiviação, as associações utilizadas de plantas de cobertura, adubação orgânica e remineralizador podem ter contribuído para que essas perdas fossem minimizadas.

Isso se justifica pelo fato de que as plantas de cobertura têm alta capacidade de realizar a ciclagem de nutrientes, como o K, absorvendo de camadas mais profundas e disponibilizando em superfície após a decomposição de seus resíduos (CRUSCIOL et al., 2008); a cama de frango atua disponibilizando grande quantidade de K (média de 34,41 g kg⁻¹ de K₂O) (HUBNER, 2023), além de atuar no aumento da matéria orgânica e na CTC do solo, aumentando as cargas negativas e os sítios de troca, o que reduz as perdas por lixiviação (ANDRADE et al., 2015; GUIMARÃES et al., 2016; SCHIMIDT; KNOBLAUCH, 2020); e o remineralizador além de ser fonte de K também pode atuar ao longo do tempo no aumento da CTC do solo através de alterações mineralógicas de seus constituintes (MARTINS et al., 2010).

Esperava-se que o consórcio de aveia + nabo + tremoço + ervilha, por ter maior diversidade de plantas em consórcio, promovesse maiores teores de K disponível quando associado à cama de frango e ao remineralizador, contudo, dentre os três consórcios, foi o que promoveu o menor teor de K e com menor efeito residual. Provavelmente isso ocorreu pelo fato desse consórcio ter gerado competição entre as plantas componentes, o que levou a uma menor produção de matéria seca e que permaneceu por menor período de tempo no solo,

principalmente quando comparado com o consórcio de aveia + nabo, já que a proporção entre plantas com relação C/N alta foi reduzida neste consórcio.

Rontani (2020) ao avaliar o acúmulo e liberação de nutrientes de diferentes consórcios com plantas das famílias Poaceae, Fabaceae e Brassicaceae em diferentes proporções de sementes, verificou que quando foi utilizada aveia-preta em monocultivo ou em consórcio com nabo-forrageiro, o acúmulo de K foi em média de 44,28 kg ha⁻¹, sendo superior aos tratamentos que não continham aveia-preta (19,46 kg ha⁻¹) ou que havia consórcio com uma Fabacea (37,75 kg ha⁻¹).

Isso demonstra que as Poaceae têm grande influência no acúmulo de K (ESPÍNDOLA et al., 2006) e o nabo-forrageiro apresenta grande capacidade de ciclagem de K no solo (VIOLA et al., 2013). Além disso, consórcios envolvendo aveia-preta e nabo forrageiro apresentam menor taxa de decomposição dos resíduos quando comparado a consórcios envolvendo plantas da família Fabaceae, o que contribui para maiores teores de K nos resíduos por maior período de tempo após o manejo (MICHELON et al., 2019; RONTANI, 2020).

De acordo com Viola et al. (2013) o tremoço é uma planta que apresenta apenas 33,79% de seu material em compartimentos mais facilmente decomponíveis, enquanto o restante se encontra em compartimentos recalcitrantes, ou seja, com maior tempo de meia vida (175 dias), o que promove uma maior permanência dos resíduos sobre a superfície do solo; já plantas como o nabo-forrageiro e a ervilha-forrageira, apresentam o maior percentual de matéria seca (62,59%) no compartimento mais facilmente decomponível, resultando em menor tempo de meia-vida (12,7 dias).

Diante disso, ao se combinar essas espécies em um único consórcio esperava-se a obtenção de maiores acúmulos de K e um maior efeito residual do que as combinações de apenas duas espécies, contudo os consórcios aveia + nabo e de tremoço + ervilha apresentaram-se superiores ao consórcio de aveia + nabo + tremoço + ervilha. Possivelmente isso ocorreu pelo fato de que o tremoço e a ervilha-forrageira não se desenvolveram de forma adequada quando cultivados juntamente com a aveia-preta e o nabo-forrageiro e esses, por sua vez, mesmo que tenham sobressaído nesse consórcio, a menor densidade de semeadura não permitiu um desenvolvimento compensatório.

Pela camada superficial do solo conter uma maior concentração de matéria orgânica devido ao cultivo sem mobilização do solo, houve maior efeito do remineralizador, uma vez que o produto depende de interações biológicas para promover sua solubilização (SILVA et al., 2014). Dessa forma, é possível que o processo de decomposição dos resíduos vegetais e da cama de frango, tenha proporcionado a liberação de ácidos orgânicos que desencadeiam

processos que facilitam a dissolução dos minerais (MANNING et al., 2017), bem como, promovido melhorias na população microbiana do solo que podem atuar fragmentando as partículas e/ou promovendo alterações químicas na superfície dos minerais (HARLEY; GILKES, 2000).

Esses ácidos orgânicos liberados reagem com a superfície dos minerais e podem complexar fortemente o Al^{3+} da sua estrutura ou formar quelatos com esse cátion em solução, forçando a instabilidade do mineral pelo aumento do gradiente de concentração (LANDEWEERTET et al., 2001).

Carvalho (2012) também observou que as plantas e materiais orgânicos são capazes de atuar sobre a disponibilização de elementos das rochas, ao passo que o solo de forma isolada demonstrou uma capacidade inferior de disponibilizar os nutrientes das rochas. O autor verificou que com o remineralizador de gnaiss na presença de plantas (espontâneas e mucuna-preta) a disponibilização de K apresentou incremento de 67%, onde o teor que era de $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aumentou para $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Já quando houve utilização de composto orgânico a base de esterco bovino, o teor de K foi o dobro ($0,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) do obtido apenas com a utilização de remineralizador.

Writzl et al. (2019) ao avaliarem a utilização de remineralizador basáltico na dose de 4 Mg ha^{-1} associado a cama de frango, após 12 meses verificaram que quando o remineralizador foi aplicado de forma isolada promoveu aumento de 5% no teor de K no solo ($0,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), já quando foi associado à cama de frango o incremento foi de 25% ($0,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), o que corrobora com o presente estudo, demonstrando que quando o remineralizador é associado à uma fonte orgânica de nutrientes há incrementos nos resultados.

Por outro lado, Ribeiro (2023) ao avaliar o efeito de doses de remineralizador basáltico até 16 Mg ha^{-1} juntamente com resíduos orgânicos de cama de frango e esterco bovino, não verificou diferença nos teores de K mesmo sendo realizada duas aplicações de remineralizador e dos resíduos e mesmo após decorridos 20 meses da primeira aplicação. Mesmo os teores sendo considerados elevados ($>0,45 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), foi verificado redução no teor de K após os 20 meses em relação aos teores iniciais: a média de K na camada de 0,00-0,20 m inicialmente era de $1,17 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e após os 20 meses foi de $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, ou seja, uma redução de 31,6%.

3.4 TEOR DE CÁLCIO

Para os teores de cálcio no solo também foi verificada interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação para as duas profundidades avaliadas. Na camada de 0,00-0,10 m os tratamentos apresentaram comportamentos muito semelhantes conforme o tempo de avaliação, sem expressar grandes diferenças em relação à utilização do remineralizador, da cama de frango ou dos consórcios, visto que a testemunha absoluta apresentou comportamento semelhante ao longo do tempo de avaliação e com teores de Ca muito próximos (Figura 9).

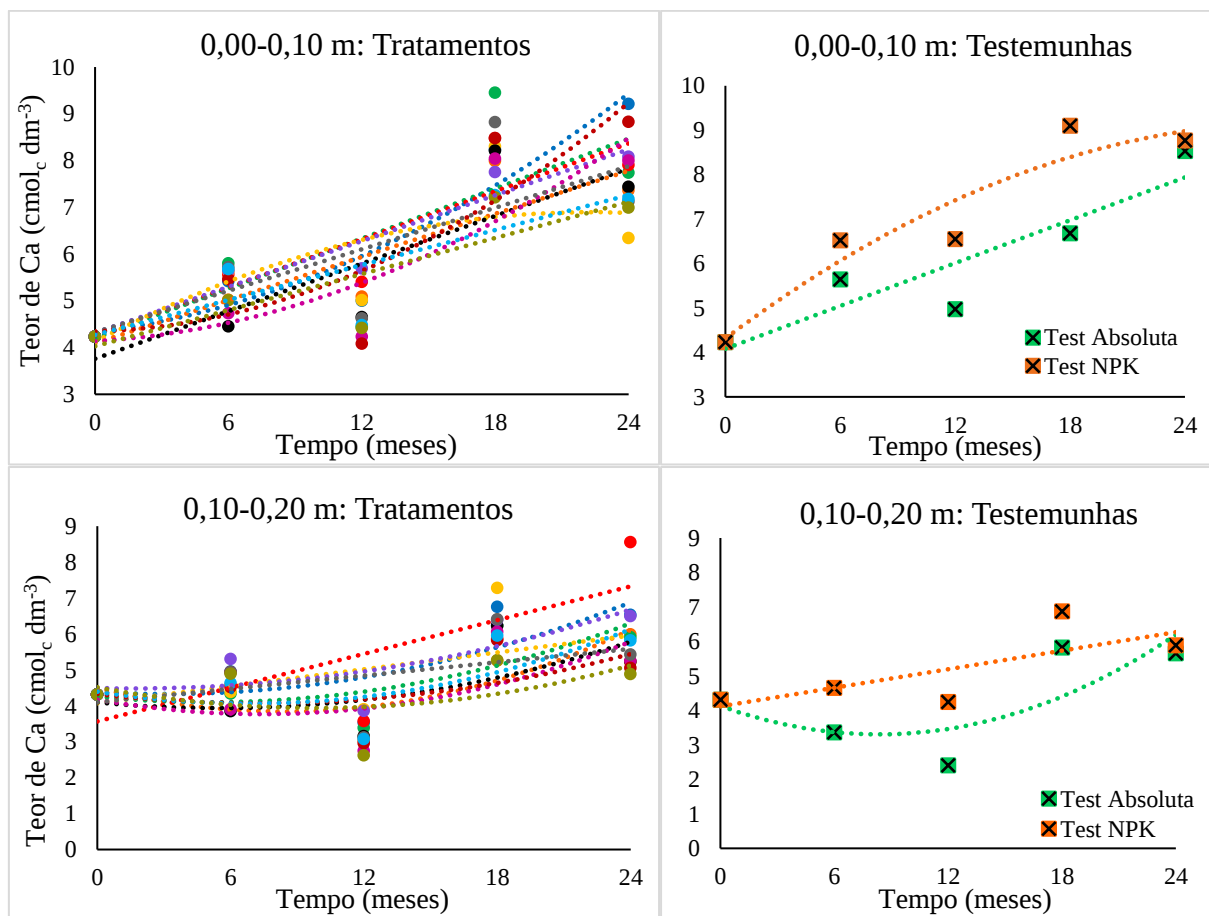


Figura 9. Teor de cálcio (cmol_c dm⁻³) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (○ Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador, Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

De forma geral, a associação entre remineralizador, cama de frango e consórcios apresentou teor máximo de Ca de 7,71 cmol_c dm⁻³ aos 24 meses; a associação apenas de

remineralizador com os consórcios apresentou teor de 7,99 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 24 meses; a associação apenas da cama de frango com os consórcios apresentou teor de 8,09 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 24 meses e a utilização unicamente dos consórcios apresentou teor de 7,38 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 23 meses (Tabela 11). Esses resultados podem ser decorrentes da própria dinâmica do Ca no solo ao longo do tempo, já que não houve uma diferença marcante entre esses tratamentos.

Tabela 11. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R^2) e valores de X (tempo) e Y (teor de Ca) para os tratamentos apresentados na figura 9, de acordo com a camada de solo avaliada

Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m			
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	*Y = 4,3254 + 0,059x - 0,0064x ² R ² = 0,90 X = 4,6 meses; Y = 4,73 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,3831 - 0,035x + 0,0058x ² R ² = 0,58 X = 3 meses; Y = 4,33 cmol _c dm ⁻³			
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 4,092 + 0,1538x R ² = 0,80 X = 24 meses; Y = 7,78 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,4974 - 0,1565x + 0,0093x ² R ² = 0,65 X = 8,4 meses; Y = 3,84 cmol _c dm ⁻³			
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	*Y = 4,198 + 0,1778x R ² = 0,57 X = 24 meses; Y = 8,47 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,2594 - 0,0623x + 0,0061x ² R ² = 0,57 X = 5,1 meses; Y = 4,10 cmol _c dm ⁻³			
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 4,262 + 0,171x R ² = 0,81 X = 24 meses; Y = 8,37 cmol _c dm ⁻³				*Y = 3,566 + 0,1567x R ² = 0,34 X = 24 meses; Y = 7,33 cmol _c dm ⁻³			
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	*Y = 4,1226 + 0,2486x - 0,0056x ² R ² = 0,55 X = 22,2 meses; Y = 6,88 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,076 + 0,0783x R ² = 0,30 X = 24 meses; Y = 5,96 cmol _c dm ⁻³			
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 3,76 + 0,1697x R ² = 0,74 X = 24 meses; Y = 7,83 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,0957 - 0,0582x + 0,0054x ² R ² = 0,40 X = 5,4 meses; Y = 3,94 cmol _c dm ⁻³			
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	*Y = 4,316 + 0,1635x R ² = 0,93 X = 24 meses; Y = 8,24 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,4937 - 0,0141x + 0,0044x ² R ² = 0,59 X = 1,6 meses; Y = 4,48 cmol _c dm ⁻³			
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 4,1374 + 0,027x - 0,0064x ² R ² = 0,79 X = 2,1 meses; Y = 4,22 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,1697 - 0,1079x + 0,0073x ² R ² = 0,40 X = 7,4 meses; Y = 3,77 cmol _c dm ⁻³			
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 4,326 + 0,148x R ² = 0,55 X = 24 meses; Y = 7,88 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,1 + 0,0618x R ² = 0,23 X = 24 meses; Y = 5,58 cmol _c dm ⁻³			
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 3,772 + 0,2037x R ² = 0,71 X = 24 meses; Y = 8,66 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,326 - 0,0702x + 0,0049x ² R ² = 0,27 X = 7,2 meses; Y = 4,07 cmol _c dm ⁻³			
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 4,27 + 0,1247x R ² = 0,68 X = 24 meses; Y = 7,26 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,3937 - 0,0962x + 0,007x ² R ² = 0,50 X = 6,9 meses; Y = 4,06 cmol _c dm ⁻³			
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 4,028 + 0,1287x R ² = 0,73 X = 24 meses; Y = 7,12 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,5157 + 0,1166x - 0,0059x ² R ² = 0,20 X = 10 meses; Y = 3,94 cmol _c dm ⁻³			
Testemunha Absoluta	*Y = 4,082 + 0,1607x R ² = 0,83 X = 24 meses; Y = 7,94 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,1286 - 0,1969x + 0,0118x ² R ² = 0,60 X = 8,3 meses; Y = 3,31 cmol _c dm ⁻³			
Testemunha NPK	*Y = 4,3134 + 0,3239x - 0,0054x ² R ² = 0,65 X = 30 meses; Y = 9,17 cmol _c dm ⁻³				*Y = 4,118 + 0,0897x R ² = 0,55 X = 24 meses; Y = 6,27 cmol _c dm ⁻³			
Médias (por grupo de associação)								
Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m			
	X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)		X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)	
	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	23,1	4,6	7,38	4,73	24	3	5,77	4,33
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	24	-	8,09	-	-	7	-	3,95
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	24	-	7,99	-	-	4,5	-	4,21
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	24	2,1	7,75	4,22	24	8,7	7,33	3,86
Testemunha Absoluta	24	-	7,94	-	-	8,3	-	3,31
Testemunha NPK	30	-	9,17	-	24	-	6,27	-

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro.

Outra questão é que a testemunha absoluta não teve a adição de nenhuma fonte de Ca e mesmo assim apresentou um comportamento de aumento dos teores ao longo do tempo, cujos valores foram semelhantes aos tratamentos utilizados, alcançando valor de $7,94 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aos 24 meses de avaliação (Tabela 11).

Como ocorre a adição de cal virgem nos aviários para a desinfecção e a mesma aumenta a concentração de Ca no material, como verificado na Tabela 3 ($46,49 \text{ g kg}^{-1}$ e 110 g kg^{-1} nos cultivos de 2021 e 2022, respectivamente), era esperado que nos tratamentos que tiveram a utilização da cama de frango ocorresse a tendência de os valores serem mais elevados do que aqueles que não tiveram a utilização da mesma, o que ocorreu apenas nos tratamentos que envolviam a associação da cama com os consórcios e sem a utilização do remineralizador.

Aumentos nos teores de Ca no solo com a aplicação de cama de frango foram verificados em muitos trabalhos. Hubner (2023) verificou aumento linear dos teores de Ca conforme o aumento da dose de cama de frango até 12 Mg ha^{-1} , tanto em solo de textura argilosa quanto em solo de textura arenosa. Schallemberger et al. (2019) verificaram que os teores de Ca em um Nitossolos Vermelho Distroférrico aumentaram em todos os tratamentos com a aplicação de cama de frango, quando comparados com a mata nativa ($4,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo que o maior valor encontrado foi de $21,79 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no cultivo de milho/aveia.

Entretanto, é importante ressaltar que o solo do presente trabalho já apresentava valores altos de Ca no início do experimento, com uma média de $4,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 1). Já o trabalho citado anteriormente, realizado por Hubner (2023), apresentava teores iniciais de $2,64 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo argiloso e $1,88 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo arenoso, o que justifica os aumentos verificados pela autora para $4,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo argiloso e para $3,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo arenoso.

Resultados apresentados por Franchini et al. (2003) constataam que, em sistemas com alto aporte de resíduos orgânicos, os cátions polivalentes como Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} são preferencialmente percolados no perfil do solo, em relação aos monovalentes como o K^+ . Essa preferência pode ser explicada pela carga nula ou negativa dos complexos orgânicos formados entre os ânions orgânicos provenientes dos extratos liberados pelas plantas e/ou da decomposição da cama de frango e os cátions polivalentes (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Nesse sentido, grande quantidade de K proveniente da decomposição dos resíduos orgânicos estaria ligada aos sítios de troca do solo, satisfazendo as cargas geradas pelo aumento do pH e pela lixiviação de Al, favorecendo a formação e manutenção de complexos entre os compostos orgânicos e o Ca, o que poderia aumentar a percolação dos mesmos (FRANCHINI et al., 2003).

Isso pode ter ocorrido, uma vez que os resultados obtidos para K demonstram que houve grandes incrementos nos teores do nutriente no solo (Figura 8 e Tabela 10) e como a quantidade de K presente na massa seca das plantas é, na maioria das vezes, bem superior às quantidades de Ca (PAVINATO; ROSOLEM, 2008), a liberação de K para o solo também ocorre em quantidades mais elevadas, podendo justificar em parte os resultados obtidos, com o K saturando os sítios de ligação do solo.

Outra questão é que esses compostos orgânicos ao formarem complexos orgânicos com o Ca, também podem aumentar a mobilidade no perfil do solo dos produtos originados da dissolução do remineralizador aplicado na superfície (AMARAL et al., 2004a). Isso pode explicar a ausência de resultados mais expressivos quando se utilizou o remineralizador, visto que era esperado maiores respostas com o uso do material, já que apresentava 8,77% de CaO (Tabela 2) e essa concentração poderia resultar em quase 702 kg ha⁻¹ de CaO com a aplicação de 8 Mg ha⁻¹ de remineralizador.

Contudo, acredita-se que essa percolação não tenha ocorrido de forma expressiva a ponto de reduzir o teor de Ca da solução do solo, visto que os teores aumentaram com o passar do tempo. Porém, a percolação pode ter ocorrido nas partes de Ca que estavam em excesso na solução do solo e não encontraram sítios de ligação disponíveis, impedindo a diferenciação mais expressiva entre os diferentes tratamentos utilizados.

O fato de a testemunha absoluta ter apresentado comportamento de aumento linear nos teores de Ca no solo ao longo do tempo é explicado pelo fato de que, pela ausência de cultivo com plantas de cobertura nessa área, houve alto índice de emergência de plantas espontâneas, as quais também podem atuar na ciclagem de nutrientes como o Ca. Fávero et al. (2000) demonstraram que as plantas espontâneas como *Portulaca oleracea*, *Euphorbia heterophylla*, *Bidens pilosa*, *Commelina benghalensis* e *Melampodium perfoliatum* tem grande influência na ciclagem de nutrientes como o P, K, Ca e Mg; chegando a acumular até três vezes mais quando comparadas com leguminosas utilizadas como plantas de cobertura.

Também é possível que o aumento do Ca²⁺ tenha recebido contribuições de outros mecanismos, como o próprio aumento nos valores de pH no solo que ocorreu na maioria dos tratamentos fazendo com que os cátions básicos sejam predominantes (SCHALLEMBERGER et al., 2019); como também pelo aumento da atividade microbiana que costuma ocorrer com a aplicação de remineralizadores, ocasionando a mineralização de reservas orgânicas de cálcio (SANTOS, 2020).

Aumento nos teores de Ca no solo com a utilização de adubo orgânico também foi verificado por Gomes et al. (2005). Os autores avaliaram a aplicação de composto orgânico

produzido a partir de restos da cultura do milho e esterco bovino e verificaram que o teor inicial de Ca de $2,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aumentou para $3,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com a aplicação de $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ do composto. Os autores sugerem que esse aumento de Ca no solo ocorreu porque a quantidade de cálcio fornecida pela adubação orgânica foi superior àquela demandada pelas plantas de milho cultivadas após a aplicação do composto, resultando na elevação dos níveis de cálcio no solo.

Herek (2018) não verificou efeito da aplicação da cama de frango sobre o teor de Ca na camada de 0,00-0,10 m quando comparado com a testemunha que não recebeu adubação e relacionou esse fato à existência de maiores concentrações iniciais de Ca no solo, fazendo com que os teores fossem pouco alterados pela utilização do resíduo, uma vez que o teor inicial que era de $6,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aumentou em média para $8,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com a utilização da cama de frango e a testemunha apresentou teor de $7,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O autor também utilizou um tratamento com adubação mineral (NPK) e verificou teor de Ca de $8,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, que também não diferiu dos demais tratamentos.

Em trabalho realizado por Hanisch et al. (2013) ao avaliar doses de remineralizador basáltico (0, 2, 4, 8 e 12 Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho distrófico combinadas com a presença ou ausência de adubação convencional (NPK) verificaram efeito das doses do remineralizador sobre o teor de Ca no solo somente 21 meses após a sua aplicação, porém, com redução dos teores do nutriente conforme o aumento da dose, indicando que nesse trabalho a solubilização do remineralizador basáltico em médio prazo pouco contribuiu para os teores de Ca no solo.

Dentre os macronutrientes era esperado que o efeito mais pronunciado da utilização do remineralizador basáltico ocorresse sobre os teores de Ca no solo, uma vez que é um dos principais nutrientes presentes na composição do material; contudo, não foi verificada diferença entre a utilização ou não do produto, apenas ocorreu alteração dos teores do nutriente ao longo do tempo, porém, isso foi verificado em todos os tratamentos utilizados.

Isso pode estar ligado à ocorrência de substituições isomórficas envolvendo Ca, Mg e Al, pois, nas reações de dissolução os elementos nem sempre são liberados e mantidos na solução na mesma proporção estequiométrica da composição mineral (KÄMPF et al., 2009). Inclusive, a precipitação e a formação de fases secundárias decorrentes da supersaturação é o mecanismo dominante da dissolução incongruente dos materiais silicáticos, sendo mais comum do que a dissolução congruente (HANISCH et al., 2013).

Além disso, na maioria dos minerais silicáticos o Ca se encontra na forma insolúvel e com certa dificuldade de liberação ao solo (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004; ALOVISI et al., 2017). Melo et al. (2012) observaram incremento máximo de $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no teor de Ca

no solo mesmo com a aplicação de 48 Mg ha^{-1} de remineralizador basáltico, demonstrando que possivelmente os minerais constituintes da rocha possuem baixa solubilidade.

Vale salientar que o conteúdo de nutrientes preexistentes no solo também tem influência sobre a dinâmica e liberação dos elementos a partir de fontes minerais, sendo que a liberação será aumentada pela menor concentração de elementos na solução do solo, enquanto que em um solo com teores iniciais elevados de determinado nutriente em solução, a velocidade de solubilização desse mesmo elemento será reduzida (BORGES et al., 2017). Diante disso, como o solo do presente trabalho já apresentava altas concentrações de Ca, pode não ter favorecido a solubilização dos minerais que continham esse nutriente.

Ribeiro (2018) verificou que com o aumento do tempo de contato do remineralizador com as soluções de ácidos orgânicos ocorreu incremento nos teores de nutrientes extraídos, até atingir taxa constante ou decréscimo. De acordo com o autor, isso ocorre porque como vários elementos químicos são simultaneamente solubilizados, alguns podem recombinar-se em solução para formar novos produtos que podem interagir com os demais íons, reduzindo sua quantidade na solução.

Já na camada de 0,10-0,20 m o comportamento do Ca se mostrou diferente para com alguns tratamentos, com destaque para a associação entre o remineralizador, com a cama de frango e com o consórcio de aveia + nabo e para a testemunha com adubação NPK que apresentaram os maiores teores de Ca até os 24 meses de avaliação, sendo de $7,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de $6,27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 11).

Esse resultado reforça a teoria de que parte do Ca liberado pelo consórcio, pela cama de frango e pelo remineralizador pode ter lixiviado devido às grandes quantidades de compostos orgânicos liberados nesse sistema, formando complexos com o Ca e aumentando sua mobilidade no perfil, o que justificaria teores elevados do nutriente na camada a partir dos 0,10 m, uma vez que o teor inicial médio de Ca nessa camada era de $4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 1).

De acordo com Amaral et al. (2004) os resíduos vegetais apresentam diferentes concentrações e composições de ácidos orgânicos, sendo que em resíduos de aveia-preta ocorre o predomínio de ácido transaconítico e no nabo-forrageiro predominam os ácidos cítrico e málico, sendo que a concentração total de ácidos no nabo-forrageiro é superior à concentração encontrada na aveia-preta. Isso pode justificar os teores mais elevados de Ca quando foi utilizado o consórcio dessas duas plantas, uma vez que o ácido cítrico tem maior efeito ácido e capacidade de complexar metais, enfraquecendo as ligações metal-oxigênio na estrutura mineral (RINALDI et al., 2013; RIBEIRO, 2018). Como nesse consórcio a proporção de nabo-

forrageiro foi maior do que no consórcio que envolvia as quatro plantas, isso pode ter ocasionado uma maior capacidade de atuar na extração de nutrientes do remineralizador.

Resultados semelhantes foram observados por Ribeiro (2018) ao avaliar a solubilidade e o potencial de liberação de nutrientes de remineralizadores, dentre eles o pó de basalto, com a aplicação de ácidos orgânicos. O autor verificou que o ácido cítrico apresenta menores valores de pH (2,7-3,6), indicativo do seu maior potencial de dissolução mineral, liberando mais íons na forma de sais e incrementando na condutividade elétrica do meio, o que indica maior atividade desses íons na solução.

Os demais tratamentos apresentaram os menores teores de Ca nessa camada em média próximo dos 6 meses após o início do experimento, com aumento dos teores após esse ponto, o que pode indicar um possível efeito da mobilidade do Ca no perfil do solo, percolando das camadas superficiais até a profundidade de 0,20 m.

Ribeiro (2023) ao avaliar doses de remineralizador basáltico até 16 Mg ha⁻¹ em associação com cama de frango e com esterco bovino, ambos na dose de 5 Mg ha⁻¹, verificou que o teor de Ca no solo após cerca de 20 meses apresentou comportamento de aumento linear de acordo com a dose de remineralizador quando foi associado à cama de frango, atingindo 5,8 cmol_c dm⁻³, ao passo que na ausência de remineralizador o teor de Ca foi de 3,5 cmol_c dm⁻³. Quando o remineralizador foi associado ao esterco bovino o máximo teor de Ca (5,5 cmol_c dm⁻³) foi obtido com a dose de 6 Mg ha⁻¹. Em ambos os casos os teores máximos de Ca não diferiram da testemunha com adubação mineral (NPK) que apresentou teor de Ca de aproximadamente 5,0 cmol_c dm⁻³.

É importante ressaltar que a presença de Ca em profundidade é importante devido à sua função no crescimento radicular, pela ação da divisão celular e pela absorção significativa pela coifa da raiz (TAIZ; ZEIGER, 2009). Como o Ca é um elemento imóvel na planta, as quantidades absorvidas pelas raízes superficiais não atendem as necessidades das raízes mais profundas, caso essas estejam em ambiente com baixos teores de Ca (TABOLKA, 2016).

3.5 TEOR DE MAGNÉSIO

Para o teor de magnésio no solo também houve interação significativa entre os tratamentos e os tempos de avaliação. Os dados se ajustaram ao modelo de regressão polinomial de 2º grau para todos os tratamentos e nas duas profundidades avaliadas, sendo que, assim como para o Ca, também foi verificada pouca variação entre os tratamentos (Figura 10).

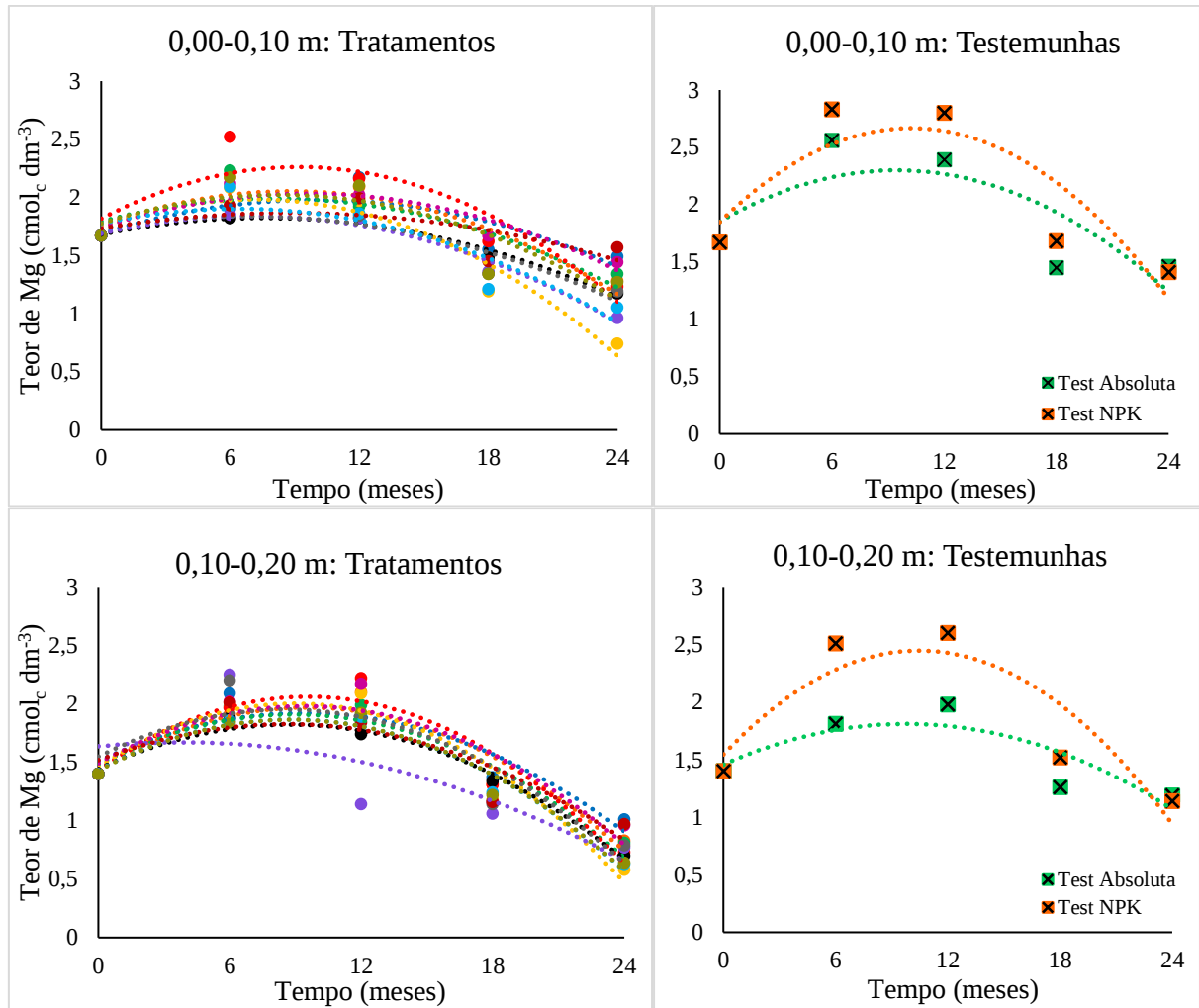


Figura 10. Teor de magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m em função das associações entre remineralizador basáltico, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura, bem como para as testemunhas, ao longo de 24 meses de avaliação. (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab), (○ Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab), (● Sem remineralizador/Sem cama/Tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Tre+erv), (● Sem remineralizador/Sem cama/Ave+nab+tre+erv), (● Sem remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Sem cama/ Ave+nab+tre+erv), (● Com remineralizador/Com cama/ Ave+nab+tre+erv).

Na camada de 0,00-0,10 m os maiores teores de Mg foram verificados no tratamento com remineralizador/com cama/ave+nab com teor de $2,26 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ aos 9,2 meses; na testemunha absoluta ($2,30 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$) aos 9,5 meses e na testemunha com adubação NPK ($2,67 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$) aos 10,3 meses. Os demais tratamentos apresentaram teores máximos muito próximos, em média de $1,94 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ obtido aos 8 meses (Tabela 12).

Na camada de 0,10-0,20 m o comportamento dos tratamentos se assemelhou ao obtido na camada anterior, inclusive com teores de Mg muito próximos aos obtidos em cada tratamento na camada superficial, bem como um período de tempo muito semelhante. Os maiores teores de Mg nessa camada foram verificados novamente no tratamento com remineralizador/com

cama/ave+nab com teor de 2,06 cmol_c dm⁻³ aos 9,5 meses; com a testemunha com adubação NPK (2,45 cmol_c dm⁻³) aos 10,5 meses e também com o tratamento sem remineralizador/sem cama/tre+erv com teor de 2,00 cmol_c dm⁻³ aos 8,9 meses (Tabela 12).

Tabela 12. Descrição das equações obtidas pela análise de regressão, valores do coeficiente de determinação (R²) e valores de X (tempo) e Y (teor de Mg) para os tratamentos apresentados na figura 10, de acordo com a camada de solo avaliada

Tratamento	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m	
Sem remineralizador/ Sem cama/Ave+nab	*Y = 1,688 + 0,0582x - 0,0029x ² X = 10 meses; Y = 1,98 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,66	*Y = 1,508 + 0,0883x - 0,0047x ² X = 9,4 meses; Y = 1,92 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,85
Sem remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 1,7563 + 0,0674x - 0,0038x ² X = 8,9 meses; Y = 2,06 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,82	*Y = 1,4351 + 0,112x - 0,0059x ² X = 9,5 meses; Y = 1,97 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,91
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab	*Y = 1,7929 + 0,0487x - 0,003x ² X = 8,1 meses; Y = 1,99 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,72	*Y = 1,4809 + 0,0959x - 0,0054x ² X = 8,9 meses; Y = 1,91 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,87
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab	*Y = 1,816 + 0,097x - 0,0053x ² X = 9,2 meses; Y = 2,26 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,82	*Y = 1,4317 + 0,1314x - 0,0069x ² X = 9,5 meses; Y = 2,06 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,91
Sem remineralizador/ Sem cama/Tre+erv	*Y = 1,7386 + 0,068x - 0,0047x ² X = 7,2 meses; Y = 1,98 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,93	*Y = 1,4589 + 0,1212x - 0,0068x ² X = 8,9 meses; Y = 2,00 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,93
Sem remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 1,68 + 0,0377x - 0,0025x ² X = 7,5 meses; Y = 1,82 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,98	*Y = 1,4429 + 0,0867x - 0,005x ² X = 8,7 meses; Y = 1,82 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,98
Com remineralizador/ Sem cama/ Tre+erv	*Y = 1,6869 + 0,0439x - 0,0032x ² X = 6,9 meses; Y = 1,84 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,98	*Y = 1,6354 + 0,0187x - 0,0025x ² X = 3,7 meses; Y = 1,67 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,79
Com remineralizador/ Com cama/ Tre+erv	*Y = 1,736 + 0,0615x - 0,0032x ² X = 9,6 meses; Y = 2,03 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,86	*Y = 1,49 + 0,1043x - 0,0056x ² X = 9,3 meses; Y = 1,98 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,77
Sem remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 1,7283 + 0,0327x - 0,0024x ² X = 6,8 meses; Y = 1,84 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,86	*Y = 1,5469 + 0,0944x - 0,0055x ² X = 8,6 meses; Y = 1,95 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,82
Sem remineralizador / Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 1,7323 + 0,0306x - 0,0017x ² X = 9 meses; Y = 1,87 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,47	*Y = 1,5166 + 0,072x - 0,0042x ² X = 8,6 meses; Y = 1,83 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,78
Com remineralizador/ Sem cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 1,7743 + 0,0399x - 0,0031x ² X = 6,4 meses; Y = 1,90 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,82	*Y = 1,4331 + 0,0983x - 0,0056x ² X = 8,8 meses; Y = 1,86 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,97
Com remineralizador/ Com cama/ Ave+nab+tre+erv	*Y = 1,7746 + 0,06x - 0,0036x ² X = 8,3 meses; Y = 2,02 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,73	*Y = 1,4291 + 0,0986x - 0,0056x ² X = 8,8 meses; Y = 1,86 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,96
Testemunha Absoluta	*Y = 1,8506 + 0,095x - 0,005x ² X = 9,5 meses; Y = 2,30 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,62	*Y = 1,4577 + 0,0719x - 0,0037x ² X = 9,7 meses; Y = 1,81 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,70
Testemunha NPK	*Y = 1,8477 + 0,1603x - 0,0078x ² X = 10,3 meses; Y = 2,67 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,75	*Y = 1,5431 + 0,1725x - 0,0082x ² X = 10,5 meses; Y = 2,45 cmol _c dm ⁻³	R ² = 0,81

Médias (por grupo de associação)								
Tratamento	0,00-0,10 m				0,10-0,20 m			
	X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)		X (meses)		Y (cmol _c dm ⁻³)	
	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Sem remineralizador/Sem cama/Consórcio	8	-	1,93	-	9	-	1,96	-
Sem remineralizador/Com cama/ Consórcio	8,5	-	1,92	-	8,9	-	1,87	-
Com remineralizador/Sem cama/ Consórcio	7,1	-	1,91	-	7,1	-	1,81	-
Com remineralizador/Com cama/ Consórcio	9	-	2,10	-	9,2	-	1,97	-
Testemunha Absoluta	9,5	-	2,30	-	9,7	-	1,81	-
Testemunha NPK	10,3	-	2,67	-	10,5	-	2,45	-

*Equação significativa pela análise de regressão a 5% de probabilidade de erro.

Os teores obtidos são classificados como altos (1,1-2,0 cmol_c dm⁻³) e como muito altos (>2,0 cmol_c dm⁻³) (PAULETTI; MOTTA, 2019) nas duas camadas avaliadas, entretanto, houve pouca alteração em relação aos valores encontrados na análise química inicial da área (Tabela

1). Isso pode ter ocorrido pelo fato de que após o manejo das plantas de cobertura houve um período superior a 30 dias de baixo índice pluviométrico (Figura 1) e parte dos nutrientes são liberados da palhada através da remoção pela água das chuvas.

Parte do Mg presente nos tecidos vegetais, cerca de 70%, é rapidamente liberado ao solo apenas com a remoção pela água da chuva, pois não faz parte de constituintes celulares; porém, os 30% restantes são mineralizados de forma mais lenta e gradual, sendo dependente da decomposição do material por fazer parte de compostos estruturais das plantas (CRUSCIOL et al., 2008).

De acordo com Heinz et al. (2011) o nabo-forrageiro pode acumular em torno de 19 kg ha⁻¹ de Mg na fitomassa, sendo que 80% é disponibilizado até os 45 dias após o manejo. Já a aveia-preta pode acumular cerca de 16 kg ha⁻¹ de Mg, sendo que a máxima liberação ocorre em torno de 50 dias após o manejo, contudo, aos 15 dias metade do Mg acumulado pela planta já terá sido liberada ao solo, com posterior redução (CRUSCIOL et al., 2008; TORRES et al., 2008).

Como os máximos teores de Mg foram obtidos em torno de 8 meses após o início do experimento, sendo esse período correspondente a 4 meses após o manejo das plantas de cobertura cultivadas no inverno de 2021, é possível que parte desse aumento seja proveniente do que foi liberado da fitomassa das plantas de cobertura, principalmente da aveia-preta e do nabo-forrageiro, visto que proporcionaram o maior aumento na camada superficial.

Além disso, em solos com aporte de resíduos culturais, além da possibilidade de complexação do Mg por ânions orgânicos tal qual ocorre para o Ca, também pode ocorrer a imobilização microbiana, sendo uma das principais vias para reduzir a disponibilidade de Mg no solo, sobretudo em relação à aplicação de fontes inorgânicas de fertilização. Isso foi corroborado por Maluf et al. (2015) que ao avaliar a disponibilidade e a taxa de recuperação de nutrientes provenientes da ciclagem de resíduos culturais de milho, braquiária, feijão-comum e estilosantes comparados a duas testemunhas sem resíduo, porém, uma com adição de fontes inorgânicas de nutrientes e outra sem aplicação de nutrientes em fontes minerais, obtiveram baixas taxas de recuperação de Mg nos solos com aporte de resíduos vegetais.

Outra questão para o menor aumento no teor de Mg pode estar relacionada ao aumento significativo no conteúdo de Ca no solo (Figura 9 e Tabela 11) que resultou na perda de Mg no sistema, além disso, há preferência na liberação dos elementos presentes nos minerais das rochas para o solo, ocorrendo na seguinte ordem: CaO>MgO>Al(OH)₃>Fe(OH)₃>SiO₂, isso associado à formação de minerais secundários faz com que a taxa de liberação de nutrientes da rocha não seja linear (LUCHESE et al., 2021).

Silveira (2016) avaliando a disponibilização de nutrientes 12 meses após a aplicação de remineralizadores (basalto, fosforito e dolomito fosfatado) também verificou que o Mg não apresentou teores significativamente mais elevados com a aplicação dos remineralizadores, sendo que com a aplicação de remineralizador de basalto o teor médio de Mg verificado pelo autor foi de $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Isso pode indicar que, assim como para o Ca, seja necessário um maior período de tempo para que haja a dissolução dos minerais e a liberação do Mg presente na rocha, uma vez que o Mg também se encontra em minerais de baixa solubilidade a curto e médio prazo (MELO et al., 2012). Além disso, os períodos de baixa precipitação pluviométrica ocorridos também podem ter prejudicado a dissolução dos minerais do remineralizador, uma vez que a água é um dos principais agentes do intemperismo.

Como a cama de frango continha $9,40 \text{ g kg}^{-1}$ de Mg no material aplicado no cultivo do ano de 2021 e 57 g kg^{-1} de Mg no material aplicado no cultivo de 2022, resultando na aplicação total de $56,40 \text{ kg ha}^{-1}$ e 342 kg ha^{-1} de Mg em cada respectivo ano, era esperado que houvesse aumento nos teores trocáveis de Mg no solo assim como ocorreu para os teores de Ca. Contudo, isso só ocorreu até cerca de 8 meses após a aplicação (Figura 10).

Moura (2022) verificou aumento nos teores de Mg com a aplicação de cama de frango, obtendo teor de $2,44 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $4,36 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com a aplicação de 12 Mg ha^{-1} de cama de frango. Contudo, esses valores foram obtidos com a associação a doses de calcário, portanto, o aumento dos teores de Mg pode ter ocorrido tanto pelas quantidades adicionadas pela cama de frango, como pela adicionada pelo calcário, além dos efeitos provenientes da correção do pH por meio do calcário que também influencia na dinâmica do Mg no solo.

Após o período de 8 meses observa-se que os teores de Mg no solo apenas reduziram em todos os tratamentos, o que pode ser justificado pela absorção dos cultivos subsequentes (milho/consórcios/soja), com a remoção do Mg disponível e exportação na forma de grãos com a colheita das culturas do milho e da soja.

Como na camada abaixo de $0,10 \text{ m}$ os teores seguiram comportamentos e teores de Mg semelhantes à camada superficial é possível que tenha ocorrido a ciclagem desse nutriente das camadas mais profundas com posterior liberação em superfície após a decomposição dos resíduos das plantas, porém, como o Mg apresenta alta mobilidade no perfil do solo é possível que as quantidades liberadas na superfície atingissem também as profundidades maiores que $0,10 \text{ m}$, fazendo com que houvesse uma constante lixiviação e ciclagem do nutriente.

Luchese et al. (2023) ao avaliar a utilização de remineralizador basáltico em solo argiloso verificou pouca alteração nos teores de Mg no solo, variando de $1,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sem

a aplicação do material para em média $1,74 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com a utilização da maior dose. É importante destacar que os autores utilizaram doses elevadas do material (33, 66 e 99 Mg ha^{-1}), contudo, mesmo com doses elevadas o aumento no teor de Mg foi pouco, porém, ainda manteve os teores em nível classificado como alto.

Anda et al. (2015) também verificou aumento nos teores de Mg com a utilização de doses de remineralizador de basalto (0, 5, 10, 20, 40 e 80 Mg ha^{-1}) incubado por 24 meses, sendo o cátion que ocupou os sítios trocáveis do solo em maior magnitude, seguido por Ca, K e Na. Os autores verificaram ainda que o incremento no teor de Mg seguiu conforme o aumento das doses, aumentando também ao longo do tempo de incubação a partir dos 12 meses avaliação. Segundo os autores é provável que essa tendência de aumento possa continuar ocorrendo após os 24 meses, principalmente em doses maiores que 20 Mg ha^{-1} , o que demonstraria um efeito residual mais longo do basalto no aumento do teor de Mg em um Latossolo.

Gotz et al. (2019) ao avaliar a associação de remineralizador (0, 3, 6, 9 e 12 Mg ha^{-1}) com esterco bovino (17 e 28 Mg ha^{-1}) após duas aplicações dentro de 12 meses, verificaram que a aplicação de 3 Mg ha^{-1} de remineralizador em associação com o esterco bovino promoveu maior teor de Mg ($1,83 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no solo em relação à utilização unicamente do remineralizador. Por outro lado, a aplicação das 3 Mg ha^{-1} de remineralizador sem a utilização do esterco ocasionou a diminuição do teor de Mg no solo para $0,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Para os autores isso ocorreu devido à ocorrência de substituições isomórficas no solo à medida que os nutrientes são liberados do remineralizador.

Vale destacar que o Mg apresentou comportamento exatamente oposto ao verificado para o Ca. Enquanto os teores de Mg apenas reduziram após cerca de 8 meses, observa-se que os teores de Ca apresentaram aumento até os 24 meses de avaliação (Figuras 7 e 8), sendo que os teores de Ca, de maneira geral, atingiram valores acima de $7,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de $5,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas respectivas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m aos 24 meses, ao passo que para o Mg os teores reduziram até entre 1,00 e $1,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na primeira camada e até entre 0,50 e $1,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na segunda camada.

Esses valores demonstram que até os 24 meses houve um desequilíbrio no solo entre os teores de Ca e de Mg, sendo que o excesso de um na solução do solo pode prejudicar a absorção do outro. Esses nutrientes apresentam propriedades químicas próximas (raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade) o que faz com que haja competição pelos sítios de adsorção no solo e na absorção pelas raízes, com o Ca apresentando maior preferência em relação ao Mg no complexo de troca do solo (LANGE et al., 2021).

Dessa forma, esse desbalanço entre a relação Ca:Mg no solo pode ter contribuído para a redução dos teores de Mg ao longo do tempo, uma vez que os sítios de adsorção estariam ocupados pelo Ca, que se encontrava em teores elevados no solo, ocasionando maior mobilidade do Mg ao longo do perfil do solo, que pode ter percolado para profundidades maiores.

Em suma, diante de todos os resultados verificados para os atributos químicos do solo pode-se estabelecer que a aplicação combinada de remineralizador basáltico com fontes de matéria orgânica pode ser uma abordagem promissora no manejo da fertilidade do solo, uma vez que nutrientes insolúveis em rochas minerais podem ser disponibilizados pela ação de ácidos orgânicos (BASAK et al., 2017) liberados durante o desenvolvimento das plantas e produzidos durante a decomposição da palhada e da matéria orgânica proveniente da cama de frango.

Além disso, outra abordagem sugerida na literatura é a de que misturas de fertilizantes químicos solúveis a base de NPK com rochas moídas poderiam se tornar um mecanismo de transição do modelo convencional para um modelo de produção mais sustentável, onde os fertilizantes solúveis supririam a necessidade inicial de macronutrientes das plantas, que posteriormente seria suprida pela maior diversidade de macro e micronutrientes disponíveis nos minerais presentes nas rochas silicatadas (THEODORO; LEONARDOS, 2006).

4 CONCLUSÕES

A associação do remineralizador com a cama de frango e com os consórcios de plantas de cobertura foi eficiente em melhorar e manter as condições químicas do solo em níveis adequados, além de reduzir o tempo necessário de reação do remineralizador.

Dentre os consórcios utilizados, o consórcio de aveia + nabo proporcionou maior efeito na interação com o remineralizador basáltico e com a cama de frango.

A utilização do remineralizador basáltico, da cama de frango e do consórcio de aveia + nabo proporcionou valores de pH, H+Al, CTC, V%, P, K, Ca e Mg semelhantes aos verificados na testemunha com adubação NPK, demonstrando que o manejo da fertilidade do solo com essas fontes alternativas foi tão eficiente quanto à adubação química convencional.

CAPÍTULO II: TEORES NUTRICIONAIS EM GRÃOS DE MILHO E DE SOJA CULTIVADOS APÓS APLICAÇÃO DE REMINERALIZADOR BASÁLTICO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de remineralizador basáltico associado com três consórcios de plantas de cobertura e com a cama de frango sobre os teores nutricionais de P, K, Ca e Mg em grãos das culturas de milho e de soja. O delineamento experimental foi de blocos casualizados em esquema de faixas subdivididas com dois fatores adicionais e quatro repetições. As faixas primárias foram três consórcios de plantas de cobertura: aveia-preta + nabo-forrageiro; tremoço branco + ervilha-forrageira; aveia + nabo + tremoço + ervilha. As faixas secundárias foram a presença e ausência de cama de frango (6 Mg ha⁻¹). As subfaixas foram a presença e ausência de remineralizador de solo (8 Mg ha⁻¹). Os fatores adicionais foram: testemunha absoluta e testemunha com adubação NPK. A cultura do milho foi cultivada na safra de verão 2021/2022 e a cultura da soja foi cultivada na safra de verão 2022/2023. Tanto para a cultura do milho como para a da soja a colheita foi realizada manualmente e descartando as bordaduras e retirando amostras de grãos para análise química. Os grãos foram secos em estufa de ventilação forçada de ar a 65 °C até atingirem peso constante e depois foram moídos para posterior análise química. Foram determinados os teores de N, P, K, Ca e Mg. A utilização do remineralizador promoveu maiores teores de P e de Mg em grãos de milho e de Ca e de Mg em grãos de soja. A associação do remineralizador com a cama de frango ou com o consórcio de aveia + nabo resultou em maiores teores de P em grãos de soja. A associação do remineralizador com a cama de frango proporcionou maior teor de K em grão de soja.

1 INTRODUÇÃO

O solo é a fonte natural de nutrientes das plantas que é complementado pela fixação simbiótica de nitrogênio, pela ciclagem de outros nutrientes vegetais e pelos adubos orgânicos. Contudo, o suprimento de nutrientes tem tido maior participação dos fertilizantes inorgânicos, que possibilitaram aumentar a produtividade das culturas, porém, esse aumento produtivo também ocasionou a necessidade pelo aumento da utilização de fertilizantes, considerando que boa parte da área agricultável tem sido mal fertilizada, em subdoses, com formulação inadequada de nutrientes e sem a correção prévia do solo (BOARETTO et al., 2014)

O uso eficiente de fertilizantes é primordial para qualquer sistema produtivo, especialmente quando se considera a demanda pelo aumento na produtividade e as preocupações com os impactos ambientais associados à utilização desses insumos, entretanto, também devem ser levadas em consideração as particularidades das exigências nutricionais das culturas, pois, o não atendimento das necessidades específicas de determinadas culturas por

determinados nutrientes pode comprometer a produção e o aproveitamento dos demais nutrientes (CANTARELLA et al., 2012).

Desta forma, reduzir as perdas de nutrientes e aumentar a absorção desses pelas plantas podem ser possibilitados a partir de fontes inovadoras de nutrientes, que possam regular a disponibilidade dos elementos e/ou controlar os mecanismos de perdas, bem como por um manejo que possibilite a construção e a manutenção sustentável da fertilidade do solo ao longo do tempo.

A dissolução e disponibilização dos nutrientes presentes nas rochas moídas ocorre de forma mais lenta do que nos fertilizantes químicos solúveis, contudo, isso é compensado pela oferta multivariada de elementos por um período de tempo mais longo de acordo com a ação do intemperismo (THEODORO et al., 2012; CARVALHO, 2013).

A solubilidade mais lenta do material tem sido apontada em alguns casos como uma barreira à utilização de rochas moídas para sustentar as altas produtividades exigidas pelo modelo de produção convencional baseado na utilização de fertilizantes químicos solúveis e prontamente disponíveis (THEODORO et al., 2012). Contudo, várias pesquisas atuais (BUSATO et al., 2022; CONCEIÇÃO et al., 2022; CURTIS et al., 2022; MEDEIROS et al., 2024) demonstram que os remineralizadores podem ser uma alternativa viável de reposição de nutrientes e construção da fertilidade sustentável do solo e que a liberação dos nutrientes pode ser acelerada por meio do manejo com mecanismos biológicos.

Segundo Theodoro e Leonardos (2006) algumas rochas podem fornecer nutrientes por um intervalo de tempo de até cinco anos após a sua aplicação ao solo e como as plantas absorvem somente o que necessitam para o seu desenvolvimento, os demais nutrientes ficam retidos na estrutura cristalina das argilas componentes da rocha adicionada ao solo, formando um estoque de nutrientes que serão disponibilizados nas safras seguintes.

Os efeitos benéficos no solo da utilização de remineralizador basáltico permitem também a melhoria no manejo nutricional das culturas, melhorando o desenvolvimento das plantas e a absorção de nutrientes, assim, o remineralizador basáltico pode ser utilizado como uma alternativa para auxiliar no manejo nutricional de culturas como o milho e a soja (CONCEIÇÃO et al., 2022).

Diante disso, a hipótese adotada é de que a utilização do remineralizador basáltico é capaz de proporcionar níveis adequados de P, K, Ca e Mg nos grãos das culturas do milho e da soja, e que quando o remineralizador for associado a adubação orgânica com cama de frango e adubação verde com diferentes consórcios os teores nutricionais podem ser proporcionados de forma semelhante ou mesmo superior à adubação convencional.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de remineralizador basáltico associado com três consórcios de plantas de cobertura e com a cama de frango sobre os teores nutricionais de P, K, Ca e Mg em grãos das culturas de milho e de soja.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição da área experimental, das condições meteorológicas durante o período em que o experimento esteve a campo, do delineamento experimental, dos tratamentos utilizados, das características dos resíduos utilizados e da condução experimental são os mesmos descritos na metodologia apresentada no Capítulo I.

2.1 ANÁLISE NUTRICIONAL DOS GRÃOS DE MILHO E DE SOJA

Tanto para a cultura do milho como para a da soja a colheita foi realizada manualmente e descartando as bordaduras e retirando amostras de grãos para análise química. Os grãos foram secos em estufa de ventilação forçada de ar a 65 °C até atingirem peso constante e depois foram moídos para posterior análise química.

Foram determinados os teores de N, P, K, Ca e Mg seguindo metodologia proposta por Lana et al. (2016).

Obs: Durante as análises químicas não foi detectado teores de Ca nos grãos de milho em nenhuma amostra e em nenhum nível, desta forma, não houve dados desse nutriente para o milho.

2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os resultados foram tabulados e submetidos à análise de variância (ANOVA), a 5% de significância para o teste F.

Quando constatados efeitos significativos as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a determinação de igualdade ou diferença entre as médias das testemunhas e as médias dos demais tratamentos foi empregado o teste de Dunnett a 5% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas nos programas estatísticos GENES (CRUZ, 2013) e SISVAR (FERREIRA, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MILHO

Não houve efeito significativo para a interação entre os fatores, porém, foi verificado efeito significativo isolado para o remineralizador basáltico sobre os teores de fósforo e de magnésio nos grãos de milho cultivado na safra de verão 2021/2022 (Tabela 13).

A utilização do remineralizador promoveu teor de P de 3,70 g ka⁻¹, enquanto que sem a utilização do material o teor obtido foi de 3,42 g kg⁻¹. Para o magnésio o maior teor também foi verificado com a utilização do remineralizador, sendo de 0,89 g kg⁻¹, enquanto que sem a utilização do material o teor obtido foi de 0,73 g kg⁻¹ (Tabela 13). Tais resultados representam incrementos de 8% e 22% nos teores de P e Mg, respectivamente, com a utilização do remineralizador.

Tabela 13. Teores médios de fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg) em grãos de milho cultivado na safra verão 21/22 em sucessão a consórcios de plantas de cobertura, aplicação de cama de frango e de remineralizador basáltico, bem como para as testemunhas.

Tratamento	P	K	Mg
Consórcio		g kg⁻¹	
Aveia + Nabo	3,81	6,75	0,99
Tremoço + ervilha	3,39	6,23	0,65
Ave + nab + Tre + Erv	3,48	6,66	0,79
CV (%)	12,42	12,73	46,34
DMS	0,48	0,90	0,41
Cama de frango			
Presença (6 Mg ha ⁻¹)	3,56	6,57	0,79
Ausência	3,56	6,52	0,83
CV (%)	8,57	9,43	29,00
DMS	0,20	0,40	0,15
Remineralizador			
Presença (8 Mg ha ⁻¹)	3,70 a	6,72	0,89 a
Ausência	3,42 b	6,38	0,73 b
CV (%)	12,07	9,94	20,38
DMS	0,26	0,40	0,10
Testemunhas			
Absoluta	4,04	7,94	1,10
Adubação NPK	4,03	7,44	1,12
DMS	0,87	2,81	0,49

Médias seguidas por letras diferentes minúsculas na coluna diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Ausência de diferença entre tratamentos e testemunhas pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.

Não houve diferença entre as testemunhas e os tratamentos utilizados, sendo que em média os teores foram de 4,04, 7,69 e 1,11 g kg⁻¹ de P, K e Mg, respectivamente, para as testemunhas. Em média, os grãos de milho apresentaram teor de K de 6,55 g kg⁻¹, independente do tratamento utilizado (Tabela 13).

Não foi verificado teor de cálcio detectável pela análise química nos grãos de milho. A mobilidade de Ca na planta é muito baixa, o que justifica não ocorrer translocação dos colmos e das folhas para os grãos (VASCONCELLOS et al., 1998). Borin et al. (2010) verificaram que, no que se refere à extração de Ca, somente 8% é exportado pelos grãos; condição semelhante foi relatada por Coelho (2006) que destaca que apenas 3 a 7% do Ca absorvido pelo milho é translocado para os grãos. Dessa forma, é justificável não ter sido verificado nenhum teor de Ca nos grãos avaliados.

O fato de a resposta do acúmulo de nutrientes nos grãos na cultura do milho em função da utilização do remineralizador ter ocorrido apenas para o P e para o Mg pode ser decorrente do comportamento verificado no solo de acordo com os tratamentos utilizados. Para esses nutrientes os pontos máximos dos teores no solo quando se utilizou o remineralizador foram alcançados durante o cultivo da cultura do milho (Figuras 5 e 8), indicando uma possível maior disponibilidade para a cultura.

Duarte et al. (2019) avaliaram os teores de nutrientes em grãos de milho de diferentes regiões, na primeira (verão) e na segunda (outono) safras, a fim de atualizar os valores de referência da remoção estimada de nutrientes pela cultura. Os autores determinaram que o teor de P em grãos de milho varia de 1,5 a 3,0 g kg⁻¹ e o de magnésio varia de 0,7 a 1,4 g kg⁻¹. Os valores de P verificados no presente estudo superam os valores de referência, indicando uma possível maior taxa de absorção pela cultura para esse nutriente.

Essa maior taxa de acúmulo de P pode ser resultante da melhoria nas condições do ambiente radicular que proporcionou maior absorção de P, uma vez que se trata de um elemento de baixa mobilidade no solo (SÁ et al., 2011). A utilização do remineralizador basáltico pode ter auxiliado na redução da adsorção de P, reduzindo o número de sítios de adsorção de P através da competição com o silício.

Quanto aos demais nutrientes Duarte et al. (2019) determinaram que os teores podem variar de 2,0-4,5 g kg⁻¹ para o K. Verifica-se que mesmo sem ter ocorrido diferenças significativas entre os tratamentos para esse nutriente, os teores verificados nos grãos de milho foram superiores aos relatados como valores de referência.

Como o solo da área experimental já apresentava teores elevados de nutrientes e os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes até o cultivo do milho, é justificável

que não tenha ocorrido diferenças em relação aos teores de K translocado para os grãos, visto que os teores no solo se encontravam elevados em ambos tratamentos e os pontos de máximo teor no solo foram verificados em período após a colheita do milho (Figuras 3 e 4).

Embora a extração de K pelo milho seja alta, a maior parte (60-75%) é acumulada na palhada (colmos, folhas, sabugo e palha), de modo que as exportações de K pelos grãos são relativamente baixas (30%) (BASSETTO JUNIOR et al., 2020; SANTOS, 2021), fazendo do milho um excelente ciclador de K. O contrário ocorre com o fósforo que é quase totalmente translocado para os grãos (77-86%) e com o magnésio que também apresenta expressiva taxa de translocação para os grãos (47-69%) (COELHO, 2006).

De acordo com Duarte et al. (2018), considerando um rendimento médio de 10 Mg ha⁻¹ de grãos de milho, a exportação de K na forma de grãos é de 45 kg ha⁻¹. Valores semelhantes aos encontrados por Resende et al. (2018), que para uma mesma produtividade de grãos (10 toneladas ha⁻¹) encontrou valor de exportação de 37 kg ha⁻¹ de K. Assim, é possível estabelecer que para estes autores a média do teor de K nos grãos de milho foi de 4,1 g kg⁻¹, sendo menor em relação aos teores obtidos no presente estudo.

Trabalhos avaliando teores de nutrientes nos grãos de milho são escassos, não sendo encontradas referências com a utilização de remineralizador. Contudo, ao se considerar referências de teores foliares, Luchese et al. (2023) não observaram aumentos de P em tecidos foliares de milho com a aplicação de remineralizador basáltico, mesmo que tenha ocorrido aumentos dos teores do nutriente no solo.

Krahl et al. (2020) verificaram que o intemperismo de remineralizador basáltico foi capaz de fornecer magnésio para as plantas de milho, sendo que a concentração na massa seca variou de 1,3 a 6,6 g kg⁻¹ de Mg e atingindo a necessidade do nutriente para o crescimento do milho, visto que a concentração foliar variou de 2,5 a 4,0 g kg⁻¹.

Crusciol et al. (2022) avaliando o teor de K em folhas de milho não verificaram diferença entre a fonte de K padrão (KCl) e os remineralizadores de rocha fonolítica e rocha de silicato de K alcalina; porém, ao avaliar a produtividade verificaram que houve aumento médio de 5,05 kg ha⁻¹ a cada quilograma de K₂O adicionado na forma de remineralizador, resultando em um índice de eficiência agrônômica médio de 3,6 vezes maior que o KCl. Portanto, essa ausência de diferenças quanto ao teor de K nos grãos não impede resultados positivos na produtividade da cultura.

A ausência de maiores diferenças entre os tratamentos também pode ter ocorrido como resultado das condições meteorológicas durante o cultivo da cultura do milho (Figura 1), visto que houve períodos de baixo índice pluviométrico e até mesmo ausência de chuva durante fases

importantes do desenvolvimento da cultura, onde ocorreria as maiores taxas de absorção de nutrientes.

Vale salientar que o período de cultivo da cultura do milho foi marcado pela severa estiagem que atingiu o estado do Paraná durante a safra 2021/2022, ocasionando perdas de 36% na produção da cultura (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA, 2022). Em decorrência da pouca precipitação, as temperaturas foram muito elevadas, com valores acima das médias históricas em praticamente todo o Estado sendo que em média, as temperaturas máximas no Paraná foram 2,4°C acima do esperado, intensificando os prejuízos (IDR-PR, 2022).

O efeito da estiagem ocorreu mesmo onde havia o cultivo de plantas de cobertura. As plantas produzem palhada que atua como barreira para as perdas de água por evaporação e promovem aumento no teor de matéria orgânica que atua como reservatório de água no solo, (ARAUJO et al., 2004; FRANCHINI et al., 2009), porém, não foi suficiente para atenuar os efeitos da tamanha estiagem.

Para alguns nutrientes o transporte no solo por fluxo em massa tem grande expressividade. Dessa forma, o movimento dos nutrientes na solução do solo em direção à superfície das raízes das plantas é promovido pelo fluxo de água absorvido pela planta, que por sua vez depende da presença de água no solo e do potencial interno de água da planta, que está relacionado às condições de umidade e temperatura (FURLANI, 2004).

Desta forma, considerando que a umidade do solo é necessária para a movimentação dos nutrientes no solo até as raízes das plantas para a absorção, é possível inferir que, em função das condições meteorológicas (Figura 1), a umidade do solo foi insuficiente e interferiu na movimentação dos nutrientes no solo e na sua absorção pelo milho, resultando na ausência de diferenças entre os tratamentos.

Como dito anteriormente, os teores de P e K observados nos grãos são maiores do que os relatados na literatura, desta forma, havendo fósforo e potássio em abundância, a sua absorção pode ser feita para além das necessidades da planta, em regimes de consumo de luxo, criando situações pouco econômicas, uma vez que não leva ao aumento da produtividade. Além disso, concentrações elevadas de K podem conduzir a desequilíbrios de outros nutrientes, como o magnésio (PALMA et al., 2020).

Devido ao K ser um íon monovalente com menor grau de hidratação comparado aos divalentes, sua absorção ocorre de forma preferencial, dessa forma, teores muito elevados de K disponível no solo pode prejudicar a absorção de Ca e/ou Mg pela planta de milho (SILVA, 2011). Contudo, como a translocação de Mg para os grãos de milho é muito baixa e os teores

do nutriente durante o cultivo da cultura permaneceram em níveis altos essa competição entre K e Mg pode não ter ocorrido a ponto de prejudicar a absorção pelas plantas.

3.2 SOJA

Houve interação significativa entre a cama de frango e o remineralizador nos teores de P e K; interação entre os consórcios de plantas de cobertura e o remineralizador e entre os consórcios e a cama de frango nos teores de P e efeito isolado para a cama de frango sobre os teores de Ca e para o remineralizador sobre os teores de Ca e Mg em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 (Tabelas 14, 15, 16 e 17).

Para os teores de P a interação entre a presença de cama de frango e a presença de remineralizador proporcionou o maior teor do nutriente nos grãos de soja ($11,61 \text{ g kg}^{-1}$), sendo 10% superior ao valor obtido sem a utilização da cama de frango ($10,54 \text{ g kg}^{-1}$) e ao valor obtido sem a utilização do remineralizador ($10,52 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 14).

Tabela 14. Teores médios de fósforo (g kg^{-1}) em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 em função das interações entre a cama de frango e o remineralizador, entre os consórcios de plantas de cobertura e o remineralizador e entre os consórcios e a cama de frango, e em relação às testemunhas.

Cama de frango	Remineralizador	
	Presença (8 Mg ha^{-1})	Ausência
Presença (6 Mg ha^{-1})	11,61 aA	10,52 aB
Ausência	10,54 bA	10,94 aA
CV (%)	7,30	
Consórcio	Cama de frango	
	Presença (6 Mg ha^{-1})	Ausência
Aveia + nabo	12,06 aA	10,72 aB
Tremoço + ervilha	10,69 bA	10,58 aA
Ave + nab + tre + erv	10,47 bA	10,89 aA
CV (%)	7,30	
Testemunhas	Cama de frango	
	Presença (6 Mg ha^{-1})	Ausência
Aveia + nabo	12,07 aA	10,71 aB
Tremoço + ervilha	10,74 bA	10,53 aA
Ave + nab + tre + erv	10,38 bA	10,99 aA
CV (%)	7,57	
Absoluta	10,88	
Adubação NPK	11,30	
DMS	1,48	

Médias seguidas por letras diferentes minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Ausência de diferença entre tratamentos e testemunhas pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.

Na interação entre os consórcios de plantas de cobertura e o remineralizador foi verificado que o maior teor de P foi obtido na associação do remineralizador com o consórcio de aveia-preta + nabo-forrageiro (12,06 g kg⁻¹), valor este 13% superior ao obtido com o consórcio de tremoço + ervilha (10,69 g kg⁻¹), 15% superior ao valor obtido com o consórcio de aveia + nabo + tremoço + ervilha (10,47 g kg⁻¹) e 12% superior ao valor obtido quando o consórcio de aveia-preta + nabo-forrageiro não recebeu aplicação do remineralizador (10,72 g kg⁻¹) (Tabela 14).

Já na interação entre os consórcios e a cama de frango o maior teor de P também foi verificado quando o consórcio de aveia-preta + nabo-forrageiro recebeu aplicação de cama de frango (12,07 g kg⁻¹), representando um incremento de 12% em relação ao consórcio de tremoço + ervilha, de 16% em relação ao consórcio de aveia + nabo + tremoço + ervilha e de 13% em relação à ausência da cama de frango (10,71 g kg⁻¹) (Tabela 14).

Não houve diferença entre os tratamentos e as testemunhas, sendo que a testemunha absoluta apresentou teor de P de 10,88 g kg⁻¹ e a testemunha que recebeu adubação química a base de NPK apresentou teor de P de 11,30 g kg⁻¹ (Tabela 14).

Os resultados são reflexo das condições verificadas no solo durante o cultivo da cultura, uma vez que a partir dos 18 meses do início do experimento (período que corresponde ao cultivo da soja) foi verificado que os teores de P quando se utilizou a associação da cama de frango com o consórcio de aveia + nabo foi de 40,12 mg dm⁻³, quando houve associação da cama de frango com o remineralizador os teores foram maiores de 30 mg dm⁻³ e quando houve associação do remineralizador com o consórcio de aveia + nabo o teor foi de aproximadamente 20 mg dm⁻³ (Tabela 7).

Além disso, foi verificado que esses tratamentos foram semelhantes e/ou apresentaram valores superiores ao obtido pela testemunha com adubação NPK, indicando que a utilização do remineralizador, da cama de frango e/ou do consórcio de aveia + nabo no manejo do P no solo não interferiu de forma negativa no conteúdo de P acumulado nos grãos de soja.

Kurihara (2004) ao avaliar os teores de nutrientes em diferentes partes de plantas de soja verificou teor de P em grãos de 5,9 g kg⁻¹ e determinou que do total de P acumulado na parte aérea da planta (10,6 kg Mg⁻¹) cerca de 56% é exportado pelos grãos com a colheita. Valores semelhantes foram verificados por Magalhães et al. (2015) que verificou um teor médio de P de 5,29 g kg⁻¹ em grãos de soja, sendo o terceiro nutriente translocado em maior quantidade para os grãos.

Já Salvagioti et al. (2021) buscando quantificar a necessidade de nutrientes na soja a partir de um conjunto de dados de diferentes estudos realizados ao longo de 10 anos em

diferentes regiões produtoras da Argentina e dos Estados Unidos da América, incluindo vários ambientes, tipos de solo e preparos do solo, constataram que os teores de P acumulados nos grãos de soja foram em média de 4,96 g kg⁻¹, mas os autores ressaltam que a ampla gama de condições ambientais e de manejo proporcionou uma grande variação nas concentrações do nutriente, que variaram de 2,48 a 8,85 g kg⁻¹.

Blanco (2015) verificou que os teores foliares de P em soja quando foi utilizada adubação orgânica com cama de frango e/ou dejetos de suínos foram semelhantes ao teor obtido com a adubação mineral e ambos foram superiores à testemunha sem adubação. Os autores atribuíram isso ao alto teor de P existente no solo onde foi aplicada a adubação orgânica, favorecendo a maior absorção de P pelas plantas.

Como em solos mais intemperizados a adsorção de P é comum, a utilização de práticas de manejo que proporcionem o incremento de matéria orgânica no solo pode favorecer o aproveitamento de P pelas plantas, uma vez que o conteúdo de matéria orgânica no solo possibilita um ambiente menos oxidativo, reduzindo as reações de fixação (ALMEIDA et al., 2003).

Assim como para a cultura do milho, verifica-se que os teores de P nos grãos de soja estão acima dos valores relatados na literatura. Isso indica que não houve limitação na absorção do nutriente pela planta, mesmo utilizando uma fonte de liberação lenta como o remineralizador.

Como não houve diferença entre a testemunha com adubação NPK e os tratamentos que não receberam adubação solúvel na semeadura, pode-se estabelecer que o manejo do P com fontes orgânicas e/ou mineral na forma de pó de basalto foi eficiente em fornecer este nutriente às plantas, seja a partir de fontes que foram adicionadas ao solo ou a partir de formas preexistentes no solo.

Como o custo de sistemas de alta produtividade de grãos é elevado e geralmente composto em maior parte pelos gastos com fertilizantes solúveis, as alternativas que resultem em ganhos de eficiência na adubação podem representar um aumento de receita e incrementos de produtividade ou economia de fertilizantes, resultando em maior eficiência e competitividade (RESENDE et al., 2012).

Em relação aos teores de K foi verificado que a combinação entre a presença de cama de frango na dose de 6 Mg ha⁻¹ com a presença de remineralizador na dose de 8 Mg ha⁻¹ promoveu o maior teor de K nos grãos de soja, sendo este de 24,60 g kg⁻¹. Não houve diferença significativa entre os consórcios de plantas de cobertura e nem entre as testemunhas. O uso de

plantas de cobertura, cama de frango e remineralizador foram estatisticamente semelhantes às testemunhas (Tabela 15).

Quando não houve aplicação da cama de frango e do remineralizador de basalto ou quando houve aplicação isolada de um desses fatores o teor médio de K nos grãos de soja foi de 22,97 g kg⁻¹, demonstrando que a combinação desses tratamentos resultou em um incremento de 7% em relação a ausência.

Tabela 15. Teores médios de K (g kg⁻¹) em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 em função da interação entre a aplicação de cama de frango e de remineralizador, da sucessão a consórcios de plantas de cobertura e em relação às testemunhas.

Cama de frango	Remineralizador	
	Presença (8 Mg ha ⁻¹)	Ausência
Presença (6 Mg ha ⁻¹)	24,60 aA	22,63 aB
Ausência	23,00 bA	23,27 aA
CV (%)	5,89	
Consórcio		
Aveia + nabo	23,64	
Tremoço + ervilha	23,45	
Ave + nab + tre + erv	23,03	
CV (%)	7,69	
Testemunhas		
Absoluta	21,44	
Adubação NPK	24,56	
DMS	3,56	

Médias seguidas por letras diferentes minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Ausência de diferença entre tratamentos e testemunhas pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.

Esse incremento possivelmente está ligado ao aporte de K pela cama de frango que apresentava a capacidade de fornecer 160,80 kg de K₂O antecedendo o cultivo da soja, considerando que a eficiência de uso do K presente na cama de frango é de 100% durante o ano de aplicação (PAULETTI; MOTTA, 2019); bem como pela liberação do K presente no remineralizador, que apresentava 1,18% de K₂O em sua composição, sendo possível liberar até 94,40 kg com a aplicação de 8 Mg ha⁻¹ do material.

Além disso, o maior teor de K nos grãos em virtude da associação do remineralizador com a cama de frango pode estar relacionado ao comportamento do K no solo, uma vez que os maiores teores no solo foram verificados no período relacionado ao cultivo da soja (Figura 3).

Desta forma, é possível que a cama de frango tenha liberado compostos e ácidos orgânicos durante seu processo de decomposição, ocasionando alterações químicas no meio.

Esses compostos são cada vez mais reconhecidos como promotores de intemperismo de silicatos por aumentar as taxas de hidrólise de minerais (LI et al., 2014).

A associação de remineralizador com a cama de frango proporcionou maiores teores de K nos grãos em relação aos teores descritos na literatura. Kurihara (2004) verificou teor de K de 15 g kg⁻¹ em grãos de soja coletados em diferentes lavouras produtoras. Oliveira Junior et al. (2013), estabeleceu que a demanda desse nutriente pela cultura da soja é de aproximadamente 32 kg de K para cada tonelada de grãos produzidos, sendo que, desse total, 17 kg são exportados das lavouras pelos grãos, ou seja, um teor de 17 g kg⁻¹. Kurihara et al. (2013) determinaram que para uma produtividade de 4.000 kg ha⁻¹ de grãos a extração de K pela cultura da soja é de 169 kg ha⁻¹, sendo que 55 kg ha⁻¹ são exportados pelos grãos, ou seja, o teor de K translocado para os grãos foi de 13,75 g kg⁻¹.

Não houve diferença entre os tratamentos e as testemunhas, que apresentaram média de teor de K de 23 g kg⁻¹. Assim como no milho, essa ausência de diferenças também é justificável pelo fato de que nas testemunhas os teores de K no solo já se encontravam elevados desde o início do experimento, o que foi facilmente mantido pela própria ciclagem realizada pelas plantas espontâneas que emergiram nas testemunhas e pela aplicação de fertilizante formulado na testemunha com adubação. Essa manutenção foi capaz de proporcionar teores de K translocados para os grãos de soja semelhantes entre os tratamentos e as testemunhas.

Assim como para o milho, trabalhos avaliando teores de K nos grãos de soja são escassos, não sendo encontradas referências com a utilização de remineralizador ou cama de frango. Contudo, Crusciol et al. (2022), avaliando os teores foliares de K na soja não verificaram diferença entre as fontes KCl e remineralizador de fonolito, sendo que o índice de eficiência agrônômica também foi semelhante entre as fontes. Esses resultados indicam que os pós de rocha podem fornecer K à cultura da soja de forma tão eficiente quanto a fonte padrão de KCl.

Como o K é o principal cátion utilizado para neutralizar cargas e ações osmóticas e é predominantemente encontrado como cátion livre ou adsorvido pode ser facilmente translocado ao longo das células ou tecidos da planta (VARGAS et al., 2018), além disso, as plantas de soja tem capacidade de absorver quantidades de potássio maiores que suas necessidades (MEURER et al., 2018). Dessa forma, havendo K disponível em níveis elevados as plantas podem ter absorvido quantidades do nutriente para além das necessidades nutricionais, que foi facilmente translocado para os grãos em quantidades superiores.

Vale destacar que teores elevados de nutrientes nem sempre são desejados, uma vez que com aumento na taxa de absorção há um consequente incremento no seu teor na planta até atingir o nível crítico, a partir do qual existe pequena probabilidade de resposta em produção. Se o suprimento do nutriente continuar, o acúmulo pode se tornar excessivo gerando consequências negativas, como redução do desenvolvimento das plantas e potencialmente diminuição da absorção de outros nutrientes, ocasionando condições de antagonismo e/ou inibição; como é o caso da relação entre o K e o Mg (SILVA; LAZARINI, 2014).

Diante disso, o aumento expressivo de K no solo é absorvido pelas culturas do milho e da soja pode gerar competição com o Mg, mesmo os teores iniciais desse nutriente estarem altos no solo.

Quanto aos teores de Ca foi verificado que tanto a utilização da cama de frango como de remineralizador proporcionou maiores teores do nutriente em relação às suas ausências, sendo que os valores foram próximos entre si, com 5,21 g kg⁻¹ de Ca quando foi utilizada a cama de frango e 5,20 g kg⁻¹ quando foi utilizado o remineralizador de basalto. Em ambos os casos houve incremento em torno de 10% nos teores de Ca presente nos grãos de soja (Tabela 16).

Não houve diferença entre os consórcios que apresentaram teor médio de Ca de 4,98 g kg⁻¹ e também não houve diferença entre os tratamentos e as testemunhas que apresentaram teor médio de Ca de 4,99 g kg⁻¹ (Tabela 16).

Já para os teores de Mg houve apenas efeito significativo do remineralizador basáltico, sendo que com a aplicação do material o teor de Mg foi de 3,13 g kg⁻¹ e na ausência do material o teor foi de 2,99 g kg⁻¹, ou seja, um incremento de aproximadamente 5% quando foi utilização o remineralizador como fonte de nutrientes. Também não houve diferença entre os tratamentos e as testemunhas que apresentaram em média teor de Mg de 3,28 g kg⁻¹ (Tabela 16).

Tabela 16. Teores médios de cálcio e magnésio (g kg^{-1}) em grãos de soja cultivada na safra de verão 22/23 em sucessão a consórcios de plantas de cobertura, cama de frango e remineralizador basáltico e em relação às testemunhas.

Tratamentos	Ca	Mg
Consórcios	g kg^{-1}	
Aveia + nabo	5,13	3,08
Tremoço + ervilha	4,86	3,02
Ave + nab + tre + erv	4,90	3,07
CV (%)	5,94	8,27
DMS	0,32	0,41
Cama de frango		
Presença (6 Mg ha^{-1})	5,21 a	3,09
Ausência	4,71 b	3,03
CV (%)	7,54	9,84
DMS	0,24	0,15
Remineralizador		
Presença (8 Mg ha^{-1})	5,20 a	3,13 a
Ausência	4,73 b	2,99 b
CV (%)	9,87	7,59
DMS	0,30	0,10
Testemunhas		
Absoluta	4,72	3,11
Adubação NPK	5,26	3,45
DMS	1,08	0,55

Médias seguidas por letras diferentes minúsculas na coluna diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Ausência de diferença entre tratamentos e testemunhas pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.

Kurihara et al. (2013) determinaram que para um potencial produtivo de 4.000 kg ha^{-1} a soja é capaz de extrair cerca de 73 kg ha^{-1} de Ca e 37 kg ha^{-1} de Mg, sendo que dessas quantidades cerca de 24 kg ha^{-1} de Ca e 9 kg ha^{-1} de Mg são exportados pelos grãos. Nesse caso, os teores médios verificados pelos autores nos grãos de soja foram de 6 g kg^{-1} de Ca e $2,25 \text{ g kg}^{-1}$ de Mg, ou seja, a taxa de exportação dos nutrientes em relação ao total extraído pelas plantas foi de 33% para o Ca e de 24% para o Mg.

O maior teor de Ca obtido com a utilização da cama de frango possivelmente ocorreu pela própria adição de Ca ao sistema, visto que o material aplicado antes da semeadura da soja apresentava capacidade de fornecer até 660 kg ha^{-1} do nutriente; além disso, a adição de fontes orgânicas promove o aumento da atividade microbológica do solo que pode aumentar a mineralização de reservas preexistentes de Ca no solo (FIGUEIREDO; RAMOS, 2009).

No caso do remineralizador o material se apresenta como uma fonte principalmente de Ca, visto que é o nutriente presente em maior quantidade no material, dessa forma, isso pode ter contribuído para a absorção do nutriente pela soja e posterior translocação para os grãos, elevando os teores em relação as plantas cultivadas sem receber a aplicação do material.

Contudo, é mais provável que o aumento do teor de Ca nos grãos tenha ocorrido através de contribuições de outros mecanismos relacionados indiretamente ao remineralizador, como o aumento do pH no solo e pelo aumento da atividade microbiana que costuma ocorrer com a aplicação de remineralizador, ocasionando a mineralização de reservas orgânicas de cálcio (SANTOS, 2020).

Para o Mg o aumento no teor dos grãos com a utilização do remineralizador pode ter ocorrido por causas semelhantes às sugeridas para o Ca. Além disso, ao se observar o comportamento do nutriente no solo foi constatado que teores de Mg no solo apenas reduziram durante o período que corresponde ao cultivo da soja, o que pode indicar a absorção pelas plantas com a remoção do Mg disponível e exportação na forma de grãos.

Embora os teores de Ca e Mg estivessem elevados no solo durante o cultivo da soja, o excesso de um na solução do solo possivelmente não prejudicou a absorção do outro pelas plantas, uma vez que os teores verificados nos grãos são semelhantes aos relatados na literatura.

Considerando que o solo da área experimental apresentava uma fertilidade média a alta os resultados obtidos demonstram que o remineralizador também pode ser utilizado como uma estratégia de manutenção da fertilidade do solo, uma vez que os teores de nutrientes no solo se mantiveram elevados durante os 24 meses de avaliação, suprimindo as necessidades das culturas do milho e da soja, visto que os teores de nutrientes translocados para os grãos dessas culturas foram semelhantes e até superiores aos relatados na literatura utilizando apenas fontes solúveis.

Dessa forma, uma alternativa ao manejo da fertilidade do solo com remineralizadores é utilizá-lo com materiais que modifiquem o pH do meio, de forma a acelerar a sua solubilização (SOUZA et al., 2017). Isso porque a alteração dos minerais ocorre principalmente por hidrólise, que é controlada pelas reações ácido-base e pelas ligações oxigênio-metal, que ocasionam a adsorção de íons H^+ e OH^- nas superfícies minerais (RIBEIRO et al., 2010).

4 CONCLUSÕES

A utilização do remineralizador promoveu maiores teores de P e de Mg em grãos de milho e de Ca e de Mg em grãos de soja.

As associações do remineralizador com a cama de frango ou com o consórcio de aveia + nabo e resultou em maiores teores de P em grãos de soja.

A associação entre o remineralizador e a cama de frango proporcionou maiores teores de K em grão de soja.

CAPÍTULO III. AVALIAÇÃO DA QUÍMICA DO SOLO APÓS UTILIZAÇÃO DE REMINERALIZADOR, PLANTAS DE COBERTURA E CAMA DE FRANGO POR MEIO DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

RESUMO

O objetivo do trabalho foi utilizar a técnica da análise de componentes principais (ACP) para comparar os teores de macronutrientes e atributos químicos do solo entre as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m e avaliar o comportamento desses indicadores aos 12 meses e aos 24 meses após a aplicação de remineralizador basáltico associado ou não ao cultivo de plantas de cobertura e adubação orgânica com cama de frango. Para a ACP optou-se por utilizar apenas os dados referentes às amostragens realizadas aos 12 e 24 meses após o início do experimento. Dessa forma, após a obtenção dos dados pela análise química do solo, foi calculada a média de cada variável analisada (P, K, Ca, Mg, pH, H+Al, CTC e V%) para cada tratamento dentro de cada camada de solo (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) e dentro de cada período de tempo de avaliação utilizado (12 e 24 meses). Para a seleção do número de componentes principais (CPs) foram determinados os autovalores e o critério adotado para a escolha do número de componentes foi selecionar aqueles que apresentaram autovalores acima de 1,00 e conseguiram sintetizar uma variância acumulada acima de 70%. A análise de componentes principais indicou que entre os atributos químicos do solo avaliados, aqueles que melhor explicam a variabilidade dos tratamentos utilizados foram pH, H+Al, Ca, Mg, V% e P. O P esteve mais relacionado aos tratamentos que associaram o remineralizador com a cama de frango e com os consórcios. pH, Ca, Mg e V% apresentaram comportamento contrário ao verificado para o H+Al, sendo que a influência desses atributos não seguiu um padrão conforme o aumento do período de tempo de avaliação, variando também entre os diferentes tratamentos.

1 INTRODUÇÃO

Os remineralizadores de solo apresentam uma liberação lenta e gradual dos nutrientes no solo, resultando que seu efeito ocorra ao longo do tempo após sua aplicação. Assim, a avaliação dos atributos químicos do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e a duração das alterações provocadas quando se utiliza esse material, permitindo estabelecer se houve melhoria e/ou manutenção da fertilidade do solo.

Como a análise da fertilidade do solo necessita da avaliação quantitativa dos diversos atributos químicos influentes, a interpretação dos resultados por métodos estatísticos univariados muitas vezes pode apresentar falhas na interpretação. Desta forma, uma opção de análise dos resultados é a utilização da análise multivariada por meio de componentes principais, que permite a redução dimensional do problema, possibilitando obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (HAIR JUNIOR et al., 2009; SILVA; LIMA, 2012).

A análise de componentes principais é uma técnica da estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais, inicialmente correlacionadas entre si, em outro conjunto de variáveis substancialmente menor e que contém a maior parte da informação do conjunto original, ou seja, está associada à ideia de redução de massa de dados com menor perda possível da informação (HONGYU et al., 2015).

Com essa técnica é possível explicar o máximo de relação entre as variáveis e determinar quais delas contribuem mais para a alteração do solo (PRAGANA et al., 2012). Os componentes principais apresentam propriedades importantes: cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e estimados com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados (HONGYU et al., 2015).

Dessa forma, a utilização dessa técnica de análise de dados pode auxiliar na tomada de decisão e no uso e manejo adequado, com base no comportamento dos atributos químicos do solo, além de poder indicar possíveis atributos que sofrem maior alteração com o manejo empregado.

O objetivo do trabalho foi utilizar a técnica da análise de componentes principais para comparar os teores de macronutrientes e atributos químicos do solo entre as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m e avaliar o comportamento desses indicadores aos 12 meses e aos 24 meses após a aplicação de remineralizador basáltico associado ou não ao cultivo de plantas de cobertura e adubação orgânica com cama de frango.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição da área experimental, das condições meteorológicas durante o período em que o experimento esteve a campo, do delineamento experimental, dos tratamentos utilizados, das características dos resíduos utilizados, da condução experimental e das análises químicas são os mesmos descritos na metodologia apresentada no Capítulo I.

2.1 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para a análise de componentes principais (ACP) optou-se por utilizar apenas os dados referentes às amostragens realizadas aos 12 e 24 meses após o início do experimento, como forma de se ter informações mais claras e sucintas sobre a utilização dos tratamentos e sobre o comportamento das variáveis.

Dessa forma, após a obtenção dos dados pela análise química do solo, foi calculada a média de cada variável analisada (P, K, Ca, Mg, pH, H+Al, CTC e V%) para cada tratamento dentro de cada camada de solo (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) e dentro de cada período de tempo de avaliação utilizado (12 e 24 meses).

Para a realização da ACP os tratamentos foram identificados da seguinte forma: T1 (sem remineralizador/com cama/ave+nab), T2 (com remineralizador com cama/ave+nab), T3 (sem remineralizador/sem cama/ ave+nab), T4 (com remineralizador/sem cama/ave+nab), T5 (sem remineralizador/com cama/tre+erv), T6 (com remineralizador/com cama/tre+erv), T7 (sem remineralizador/sem cama/tre+erv), T8 (com remineralizador/sem cama/tre+erv), T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv), T10 (com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv), T11 (sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv), T12 (com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv), T13 (testemunha absoluta) e T14 (testemunha NPK).

Com as médias obtidas foi realizada a ACP com base na matriz de correlação existente entre as componentes e as variáveis químicas do solo, de forma a identificar novas variáveis que explicam a maior parte da variabilidade.

Para a seleção do número de componentes principais (CPs) foram determinados os autovalores e plotado o gráfico de *scree-plot* que representa os autovalores em função da ordem dos CPs, representando graficamente a porcentagem de variância explicada por cada atributo. Quando essa porcentagem reduz e a curva passa a ser quase paralela ao eixo das abscissas, os componentes correspondentes podem ser excluídos. O critério adotado para a escolha do número de componentes foi selecionar aqueles que apresentaram autovalores acima de 1,00 e conseguiram sintetizar uma variância acumulada acima de 70% (HAIR JUNIOR, 2009).

Nesse caso, o maior autovalor é associado ao primeiro CP, o segundo maior autovalor ao segundo CP, até que o menor autovalor esteja associado ao último CP, o que coloca os primeiros como os mais importantes, ou seja, os primeiros CPs explicam, geralmente, a maior parte da variância das variáveis originais (CASTILHO et al., 2017).

A ACP foi realizada no programa estatístico GENES (CRUZ, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados obtidos pela análise de componentes principais, foi desenvolvido os gráficos *scree-plot* para a verificação da importância e da contribuição de cada variável para a explicação da variância total (Figuras 11 e 12). A partir disso, conjuntamente

com os autovalores, foi determinado quantos componentes devem ser retidos, de modo que expliquem acima de 70% da variância.

De acordo com Rencher (2002) pelo menos 70% da variância total deve ser explicada pelo primeiro e segundo componentes principais. Portanto, dois primeiros componentes principais resumem efetivamente a variância amostral total e podem ser utilizados para o estudo do conjunto de dados.

Em ambas camadas de solo foi verificado que os dois primeiros CPs de cada período de tempo de avaliação foram suficientes para explicar uma variância total acima de 70% e apresentaram elevados autovalores. Isso demonstra que, de 8 variáveis, passa-se a utilizar duas, havendo redução de dimensionalidade das variáveis originais, com perda de explicação de menos de 30% nas duas camadas avaliadas. Os demais CPs contribuíram de forma irrisória havendo estabilização após o segundo ponto e, portanto, não foram considerados na análise.

Quanto ao percentual de variância explicado pelos CPs verifica-se que na camada de 0,00-0,10 m o primeiro (CP1) e o segundo (CP2) componentes são responsáveis por: 84,6% da variância total aos 12 meses, sendo 64,6% no CP1 e 20% no CP2; e 77,8% da variância total dos dados aos 24 meses, sendo 61,5% no CP1 e 16,3% no CP2 (Figura 11).

Foi verificado que nessa camada os autovalores para cada CP foram de 5,2 e 1,6 aos 12 meses e de 4,9 e 1,3 aos 24 meses, para o CP1 e para o CP2, respectivamente (Figura 11). Segundo Freddi (2008) os CPs que apresentam autovalores superiores a 1,00 podem ser utilizados para uma ordenação bidimensional das variáveis, permitindo a construção de um gráfico biplot.

Já os autovetores apresentados juntamente nas figuras correspondem aos dois principais componentes e podem ser considerados como uma medida da importância de cada variável em relação a cada um dos CPs, ou seja, indicam a contribuição de cada atributo na variância total de cada CP. Os sinais positivos ou negativos indicam as relações diretamente e inversamente proporcionais. Optou-se por destacar apenas os atributos cuja contribuição fosse elevada, nesse caso, foi utilizado como parâmetro os autovetores com valores iguais e/ou superiores a 0,8 (LIMA et al., 2013) independentemente se positivos ou negativos.

Na camada de 0,00-0,10 m foi verificado que os atributos mais significativos (autovetores >0,8) para o CP1 foram: Ca, pH, H+Al, CTC e V% aos 12 meses; e Ca, Mg, pH, H+Al e V% aos 24 meses. Para o CP2 o atributo mais significativo foi apenas o P para os 12 e para os 24 meses (Figura 11). Dessa forma, pode-se considerar que o CP1 esteve mais relacionado aos atributos ligados à acidez do solo e que o CP2 esteve mais relacionado à dinâmica do P no solo.

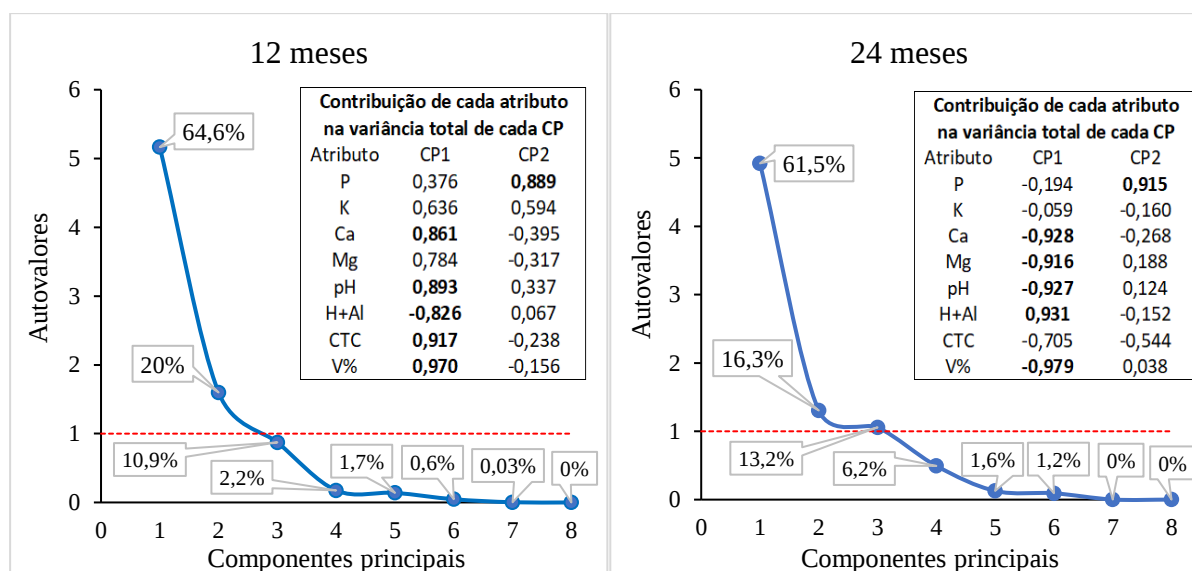


Figura 11. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelos componentes principais (CPs) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método *scree-plot* para a camada de 0,00-0,10 m de acordo com o período de avaliação.

Analisando-se em relação aos sinais positivos e negativos é possível ressaltar que no CP1, independentemente do período de avaliação, o atributo H+Al teve correlação inversa aos demais atributos significativos, ou seja, à medida que esse atributo diminuiu no solo os demais atributos aumentaram, sendo que a situação contrária também foi verdadeira. Isso está relacionado a própria dinâmica da acidez do solo, visto que o comum é que haja decréscimo nos teores de H+Al com o aumento do pH devido à neutralização dos íons H^+ e Al^{3+} , o que também resulta no aumento dos teores de Ca e Mg no solo, aumentando a atividade dessas bases trocáveis na CTC (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; SILVA et al., 2008).

Já na camada de 0,10-0,20 m o primeiro e o segundo componentes foram responsáveis por 80,4% da variância total aos 12 meses, sendo 58,3% no CP1 e 22,1% no CP2; e por 75,3% da variância total dos dados aos 24 meses, sendo 54,3% no CP1 e 21% no CP2. Nessa camada os autovalores para cada CP foram de 4,7 e 1,8 aos 12 meses e de 4,4 e 1,7 aos 24 meses, para o CP1 e para o CP2, respectivamente (Figura 12). Assim como na camada superficial os CPs apresentaram autovalores superiores a 1,00 podendo ser utilizados para a ordenação bidimensional das variáveis.

Vale destacar que essa simplificação da análise truncando a base em um número de variáveis menor do que os dados originais não ocasiona perda significativa de informação, uma vez que, em alguns casos, torna-se mais interessante recuperar a parte da informação que seja mais relevante ao problema estudado, ao invés de apenas recuperar uma quantidade elevada da informação (LYRA et al., 2010).

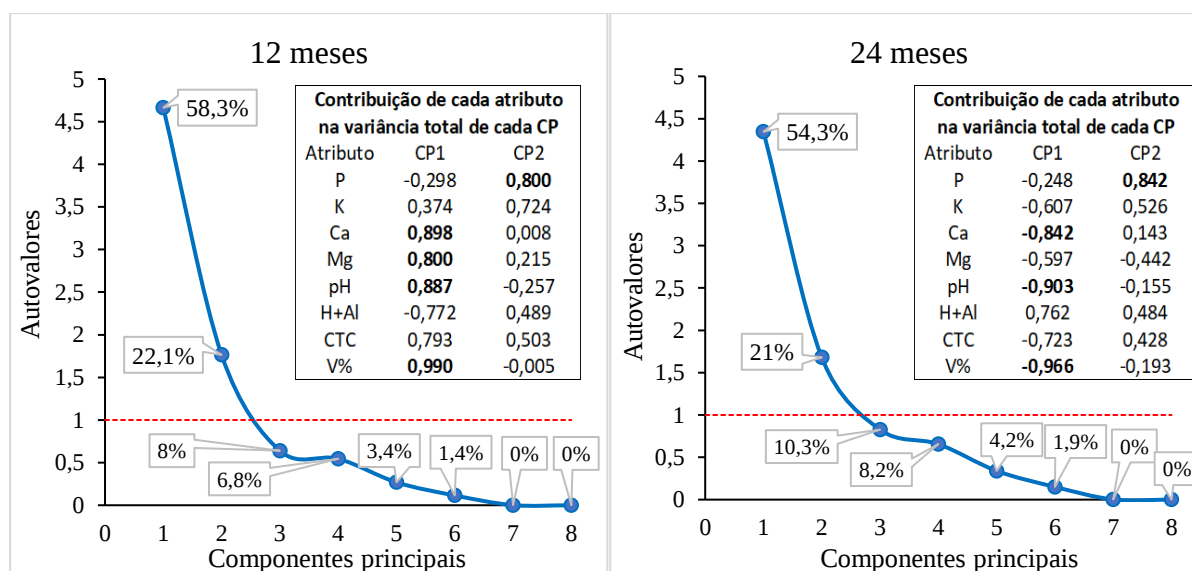


Figura 12. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelos componentes principais (CPs) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método *scree-plot* para a camada de 0,10-0,20 m de acordo com o período de avaliação.

Quando aos autovetores, foi verificado que na camada de 0,10-0,20 m os atributos que mais contribuíram para a variância total (autovetores > 0,8) do CP1 foram Ca, Mg, pH e V% aos 12 meses; e Ca, pH e V% aos 24 meses. Para o CP2 o atributo mais significativo foi novamente apenas o P aos 12 meses e aos 24 meses (Figura 12). A contribuição das variáveis na variância total de cada CP seguiu comportamento semelhante ao observado na camada de 0,00-0,10 m, onde o CP1 esteve mais relacionado aos atributos ligados à acidez do solo e que o CP2 esteve mais relacionado à dinâmica do P no solo.

Nas Figuras 13 e 14 são apresentados os gráficos biplot com o comportamento das variáveis em função do CP1 e do CP2 e a localização de cada tratamento em relação aos atributos químicos do solo. Nessas figuras é possível reconhecer padrões, porém, não se trata de uma técnica de classificação, pois, apenas ilustra a relação entre os elementos no gráfico de escores (LYRA et al., 2010). Quanto maior for o comprimento de um vetor, mais influente o mesmo será para a análise (BONCARD et al., 2011).

Nesse contexto, na camada de 0,00-0,10 m aos 12 meses é possível observar que em relação ao CP1 os tratamentos T2 (com remineralizador/com cama/ave+nab) e T14 (testemunha NPK) se assemelham pelos atributos de pH, Ca, CTC e V%, enquanto que esses mesmos tratamentos se diferenciam dos tratamentos T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv) e T12 (com remineralizador/sem cama/ ave+nab+tre+erv) pelo atributo de H+Al; em relação ao CP2 observa-se que o atributo P aproxima os tratamentos T2 e T6 (com remineralizador/com cama/tre+erv) e distancia esses tratamentos do T13 (testemunha absoluta) (Figura 13).

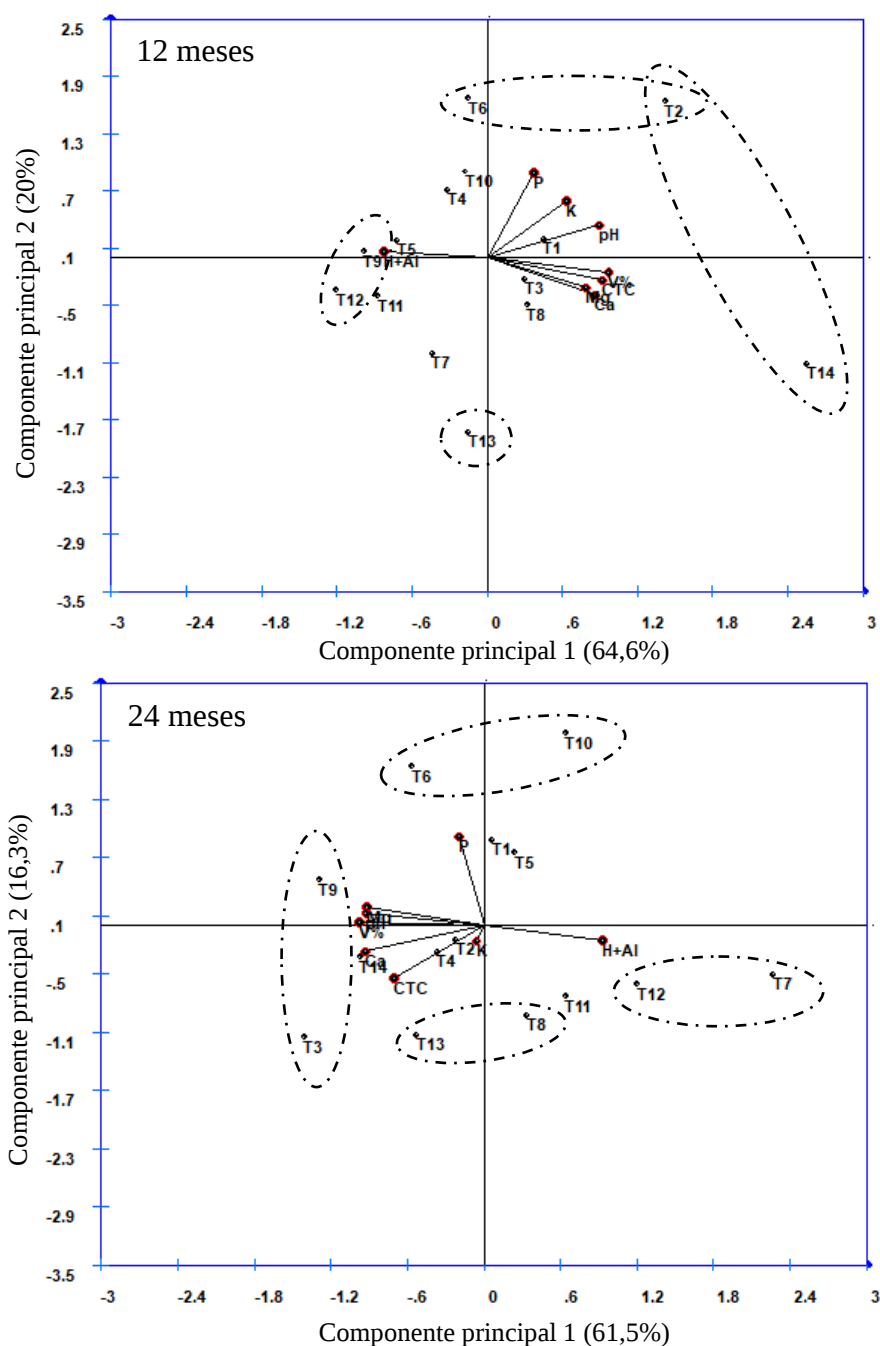


Figura 13. Gráfico biplot dos componentes principais em função dos tratamentos associando remineralizador, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura e dos atributos químicos do solo na camada de 0,00-0,10 m aos 12 e 24 meses de avaliação. T1: sem remineralizador/com cama/ave+nab, T2: com remineralizador/com cama/ave+nab, T3: sem remineralizador/sem cama/ave+nab, T4: com remineralizador/sem cama/ave+nab, T5: sem remineralizador/com cama/tre+erv, T6: com remineralizador/com cama/tre+erv, T7: sem remineralizador/sem cama/tre+erv, T8: com remineralizador/sem cama/tre+erv, T9: sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv, T10: com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv, T11: sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv, T12: com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv, T13: testemunha absoluta e T14: testemunha NPK.

Já aos 24 meses de avaliação a condição observada é alterada em relação ao período de 12 meses, demonstrando que o tempo de reação do remineralizador no solo, bem como o de adoção e manutenção de um sistema de manejo com adubação orgânica e com plantas de

cobertura tem grande influência na dinâmica dos atributos químicos do solo e no efeito que cada tratamento exercerá para cada atributo.

Dessa forma, aos 24 meses foi verificado que em relação ao CP1 os tratamentos T3 (sem remineralizador/sem cama/ave+nab) e T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv) são aproximados pelos atributos de pH, V%, Ca e Mg, ao passo que se distanciam dos tratamentos T7 (sem remineralizador/sem cama/tre+erv) e T12 (com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv) pelo atributo de H+Al; já para o CP2 foi observado que os tratamentos T6 (com remineralizador/com cama/tre+erv) e T10 (com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv) se aproximam pelo atributo de P, ao passo que se distanciam dos tratamentos T8 (com remineralizador/sem cama/tre+erv) e T13 (testemunha absoluta) pelo efeito do mesmo atributo (Figura 13).

Isso se comprova quando as médias gerais de cada tratamento para cada atributo apresentadas na Tabela 17 são analisadas. Aos 12 meses os tratamentos T2 e T14 apresentaram médias com valores aproximados para pH (5,66 e 5,59, respectivamente), Ca (5,40 e 6,55 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), CTC (13,37 e 14,89 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente) e V% (67,29 e 72,16%, respectivamente), justificando sua proximidade na ACP; já para o atributo de H+Al foi verificado que a relação de proximidade entre os tratamentos T9 e T12 ocorreu pois as médias foram semelhantes (5,06 e 5,10 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), enquanto que se distanciaram dos tratamentos T2 e T14 por apresentarem médias distintas (4,37 e 4,15 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente).

Para o atributo P os tratamentos T2 e T6 apresentaram as maiores médias (25,18 e 21,26 mg dm^{-3} , respectivamente) enquanto o tratamento T13 apresentou a menor média (6,77 mg dm^{-3}), justificando as relações de proximidade e distanciamento (Tabela 17).

Dessa forma, aos 12 meses os tratamentos com remineralizador/com cama/ave+nab (T2) e com remineralizador/com cama/tre+erv (T6) promoveram maior influência sobre o teor de P, enquanto que a menor influência para o atributo foi promovida pela testemunha absoluta. Isso reforça a premissa de que o remineralizador tem grande capacidade de influenciar o comportamento do P no solo e que sua associação à cama de frango e aos consórcios de aveia + nabo e de tremço + ervilha podem potencializar o efeito, tanto a partir da liberação de compostos orgânicos que também interagem com as frações de P no solo, como pelo incremento da atividade microbiana.

Tabela 17. Médias dos atributos químicos do solo que apresentaram maior influência na ACP na camada de 0,00-0,10 m aos 12 e 24 meses para 14 tratamentos.

a canáada de 0,00-0,10 m aos 12 e 24 meses para 14 tratamentos.							
Tratamentos	CP1					CP2	
	pH	H+Al	Ca	Mg	CTC	V%	P
12 meses							
1	5.30	4.42	5.08	2.09	12.80	65.42	17.17
2	5.66	4.37	5.40	2.16	13.37	67.29	25.18
3	5.32	4.53	5.00	2.17	12.81	64.65	14.75
4	5.19	4.49	4.43	1.92	11.99	62.43	18.05
5	5.21	4.77	4.64	1.82	12.08	60.34	16.50
6	5.40	4.87	4.23	2.02	12.45	60.96	21.26
7	5.16	4.51	5.01	1.97	12.16	62.90	12.66
8	5.23	4.38	5.69	1.82	12.89	66.02	15.38
9	5.06	5.06	4.08	1.99	12.34	58.97	11.64
10	5.19	4.74	4.42	2.10	12.52	62.02	19.60
11	5.15	4.73	4.61	1.84	11.94	60.46	13.48
12	5.02	5.10	4.47	1.86	12.29	58.55	13.17
13	5.16	4.82	4.97	2.39	13.08	63.05	6.77
14	5.59	4.15	6.55	2.80	14.89	72.16	15.46
24 meses							
1	5.33	4.48	7.36	1.28	14.23	68.42	39.02
2	5.28	4.26	7.90	1.23	14.61	70.77	28.47
3	5.60	3.97	9.20	1.49	15.64	74.45	18.56
4	5.49	4.10	7.74	1.34	14.31	71.08	15.87
5	5.27	4.30	7.44	1.17	13.85	68.76	29.95
6	5.38	3.78	8.00	1.44	13.97	72.75	42.38
7	4.73	5.92	6.34	0.74	13.84	57.31	14.85
8	5.10	4.33	8.07	0.96	14.25	69.60	8.70
9	5.51	4.03	8.83	1.57	15.39	73.78	44.84
10	5.07	4.74	6.99	1.26	13.67	66.54	50.12
11	5.09	4.95	7.12	1.19	14.44	65.67	14.78
12	4.83	5.36	7.18	1.05	14.41	62.79	17.28
13	5.13	4.22	8.53	1.46	15.05	71.82	10.52
14	5.50	3.79	8.77	1.41	14.72	74.22	17.48

Para esse período de tempo ainda foi verificado que o tratamento com remineralizador/com cama/ave+nab foi semelhante à testemunha com adubação NPK sobre o comportamento do pH, Ca, CTC e V% no solo, com relações mais satisfatórias para esses atributos em relação aos tratamentos sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv (T9) e com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv (T12) que apresentaram os maiores teores de H+Al, comprovando a relação inversa entre esses atributos. Nesse caso, é possível estabelecer que a associação apenas do remineralizador ou da cama de frango com o consórcio de aveia + nabo + tremoço + ervilha não promove ação satisfatória nos níveis de pH, Ca, CTC e V%, consequentemente levando ao aumento dos teores de H+Al.

Aos 24 meses o comportamento dos tratamentos em relação aos atributos químicos do solo alterou, além de que as médias aumentaram nesse período de avaliação. Nesse caso, observa-se que o atributo H+Al teve maior influência sobre os tratamentos T7 (sem remineralizador/sem cama/tre+erv) e T12 (com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv), visto que apresentaram as maiores médias (5,92 e 5,36 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), ao passo que o pH, Ca, Mg, CTC e V% tiveram maior influência sobre os tratamentos T3 (sem remineralizador/sem cama/ave+nab) e T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv).

Já no CP2 o P exerceu maior influência sobre os tratamentos T6 (com remineralizador/com cama/tre+erv) e T10 (com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv) (Figura 13). Esses tratamentos apresentaram as maiores médias de P (42,38 e 50,12 mg dm^{-3} , respectivamente), enquanto que os menores valores (8,70 e 10,52 mg dm^{-3}) foram verificados nos tratamentos T8 (com remineralizador/sem cama/tre+erv) e T13 (testemunha absoluta), respectivamente (Tabela 17).

Nos dois tempos de avaliação observa-se que para a camada de 0,00-0,10 m o P apresentou um comportamento de influência similar, visto que sua maior ação permaneceu ocorrendo em tratamentos que envolveram a utilização do remineralizador sempre em associação a cama de frango e a algum dos consórcios; enquanto que a influência ocasionada pelos demais atributos (pH, Ca, Mg, CTC e V%) não seguiu um padrão conforme o aumento do período de tempo de avaliação, variando também entre os diferentes tratamentos.

Vale destacar que tanto aos 12 meses como aos 24 meses os tratamentos que mais se aproximaram da testemunha absoluta em relação ao P foram tratamentos que não envolveram a utilização do remineralizador, ou que quando houve sua utilização ele foi associado a somente um dos fatores biológicos de intemperismo (cama de frango ou consórcios). Já era esperado que a testemunha absoluta fosse o tratamento que mais de distanciasse do P, visto que não houve a adição de nenhuma fonte do nutriente, porém, quanto aos demais tratamentos, a proximidade com a testemunha absoluta, reforça a premissa de que o remineralizador tem capacidade real de interferir na dinâmica no nutriente e de incrementar os teores no solo. Comprova-se também que a ação do remineralizador é potencializada pela cama de frango e pelos consórcios de plantas de cobertura.

Além disso, também é provável que a maior atividade do P sobre tratamentos que combinaram a utilização do remineralizador se deva ao fato da baixa mobilidade do P no solo juntamente com a baixa mobilidade do remineralizador, interferindo em maior grau na camada mais superficial do solo.

Para a camada de 0,10-0,20 m aos 12 meses foi observado que no CP1 os atributos pH, Ca, Mg e V% promoveram maior influência para os tratamentos T2 (com remineralizador/com cama/ave+nab) e T14 (testemunha NPK), sendo responsáveis pela similaridade entre esses tratamentos e pelo distanciamento dos tratamentos T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv), T10 (com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv) e T13 (testemunha absoluta). Já no CP2 o atributo P teve maior atividade para os tratamentos T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv) e T10 (com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv), o que os distanciou dos tratamentos T5 (sem remineralizador/com cama/tre+erv), T11 (sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv) e T13 (testemunha absoluta) (Figura 14).

Já Para os 24 meses de avaliação foi observado que no CP1 os atributos Ca, pH e V% exerceram maior influência para a similaridade entre os tratamentos T3 (sem remineralizador/sem cama/ave+nab) e T14 (testemunha NPK); enquanto houve distanciamento dos tratamentos T5 (sem remineralizador/com cama/tre+erv), T6 (com remineralizador/com cama/tre+erv), T7 (sem remineralizador/sem cama/tre+erv), T9 (sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv), T10 (com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv), T11 (sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv) e T12 (com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv). No CP2 o P teve maior influência sobre os tratamentos T1 (sem remineralizador/com cama/ave+nab) e T4 (com remineralizador/sem cama/ave+nab), ao passo que a testemunha com adubação NPK (T14) foi o tratamento com a menor influência do P (Figura 14).

Aos 12 meses no CP1 os tratamentos T2 e T14 apresentaram as maiores médias para pH (5,16 e 5,59, respectivamente), Ca (3,57 e 4,25 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), Mg (2,22 e 2,60 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente) e V% (62,65 e 68,33%, respectivamente), justificando sua proximidade na ACP; enquanto os tratamentos T9, T10 e T13 apresentaram os menores valores. Em contrapartida no CP2 os tratamentos T9 e T10 apresentaram as maiores médias de P (9,02 e 10,53 mg dm^{-3} , respectivamente), enquanto que os tratamentos T5, T11 e T13 apresentaram as menores médias (3,02, 2,77 e 2,98 mg dm^{-3} , respectivamente), justificando as relações de proximidade e distanciamento (Tabela 18).

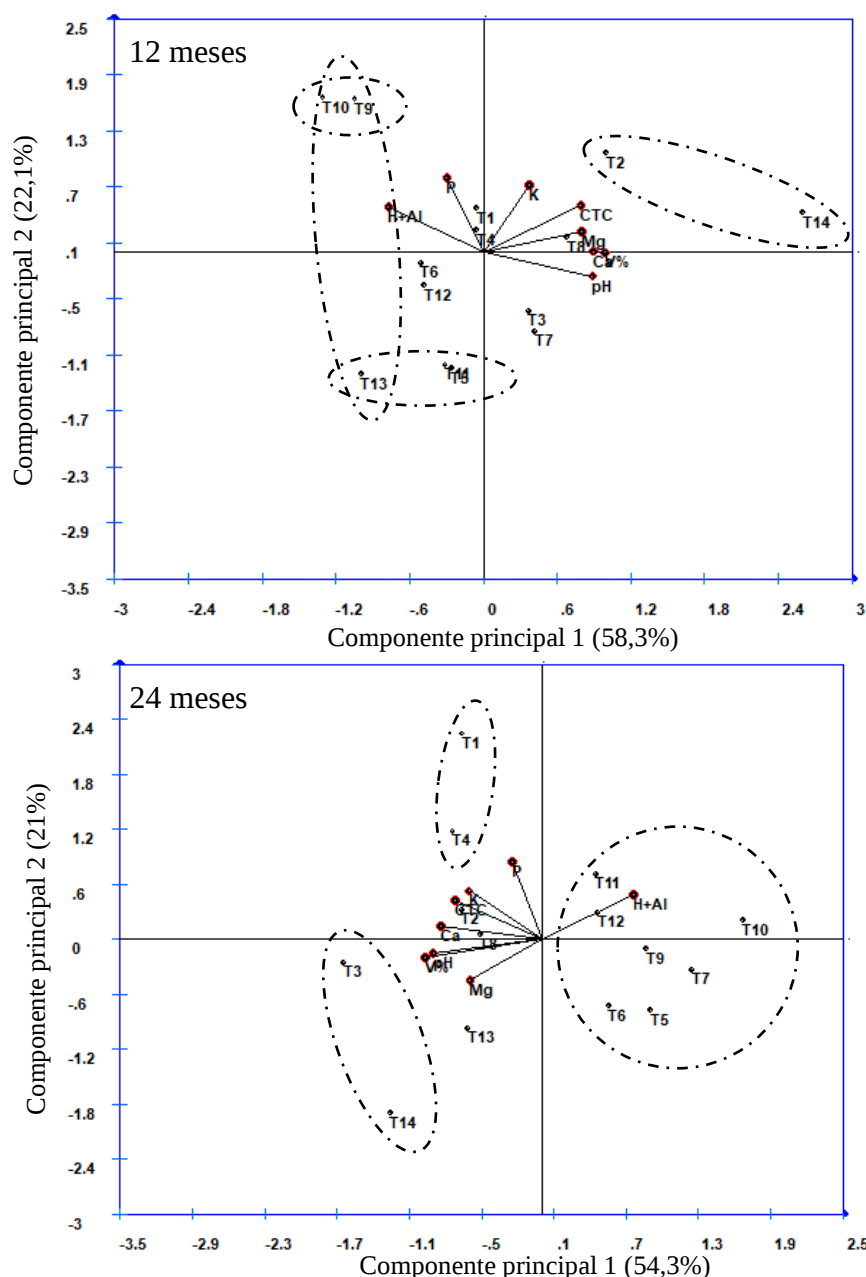


Figura 14. Gráfico biplot dos componentes principais em função dos tratamentos associando remineralizador, cama de frango e consórcios de plantas de cobertura e dos atributos químicos do solo na camada de 0,10-0,20 m aos 12 e 24 meses de avaliação. T1: sem remineralizador/com cama/ave+nab, T2: com remineralizador/com cama/ave+nab, T3: sem remineralizador/sem cama/ave+nab, T4: com remineralizador/sem cama/ave+nab, T5: sem remineralizador/com cama/tre+erv, T6: com remineralizador/com cama/tre+erv, T7: sem remineralizador/sem cama/tre+erv, T8: com remineralizador/sem cama/tre+erv, T9: sem remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv, T10: com remineralizador/com cama/ave+nab+tre+erv, T11: sem remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv, T12: com remineralizador/sem cama/ave+nab+tre+erv, T13: testemunha absoluta e T14: testemunha NPK.

Já para os 24 meses no CP1 os tratamentos T3 e T14 tiveram as maiores médias para Ca (6,53 e 5,89 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente), pH (5,32 e 5,30, respectivamente) e V% (68 e 68,66%, respectivamente). No CP2 os tratamentos T1 e T4 apresentaram as maiores médias de P (13,27 e 12,28 mg dm^{-3} , respectivamente) (Tabela 18).

Tabela 18. Médias dos atributos químicos do solo que apresentaram maior influência na ACP na camada de 0,10-0,20 m aos 12 e 24 meses para 14 tratamentos.

Tratamentos	CP1			CP2	
	Ca cmol _c dm ⁻³	Mg	pH	V%	P mg dm ⁻³
12 meses					
1	3.03	2.10	5.06	58.64	5.28
2	3.57	2.22	5.16	62.55	3.21
3	3.53	1.87	5.27	60.28	3.19
4	3.39	1.99	5.11	58.85	6.42
5	3.15	1.74	5.12	58.72	3.02
6	2.74	2.17	5.03	56.77	6.85
7	3.90	2.09	5.12	60.35	2.30
8	3.85	2.14	5.15	61.61	4.43
9	2.96	1.83	4.95	54.16	9.02
10	2.62	1.91	4.89	53.26	10.53
11	3.11	1.92	5.20	56.85	2.77
12	3.07	1.89	5.00	56.98	3.27
13	2.41	1.98	5.10	53.43	2.98
14	4.25	2.60	5.59	68.33	5.99
24 meses					
1	5.99	0.83	4.67	63.91	13.27
2	5.55	0.73	5.13	65.46	8.00
3	6.53	1.01	5.32	68.00	4.37
4	5.91	0.81	5.18	64.37	12.28
5	5.23	0.70	4.42	61.09	3.15
6	5.25	0.95	4.75	61.12	6.25
7	5.21	0.58	4.49	59.22	5.35
8	6.50	0.77	4.67	65.67	6.35
9	5.05	0.97	4.41	59.08	4.05
10	4.88	0.64	4.21	57.37	5.41
11	5.42	0.79	4.70	60.14	6.78
12	5.82	0.62	4.66	61.09	4.04
13	5.66	1.19	4.92	65.13	4.42
14	5.89	1.14	5.30	68.66	3.04

O comportamento observado aos 12 meses foi semelhante entre as camadas de solo avaliadas, visto que as similaridades se mantiveram entre alguns tratamentos e a relação entre tratamentos e atributos no CP1 provém da associação do remineralizador com a cama de frango e com os consórcios de plantas de cobertura, especialmente do consórcio de aveia + nabo, sendo similar ao efeito promovido pela utilização da adubação química convencional a base de NPK. Aos 24 meses o comportamento observado no CP1 também se manteve semelhante entre as camadas do solo, indicando que as características químicas ligadas à acidez do solo e à dinâmica de cátions básicos como o Ca e o Mg podem ser construídas e mantidas ao longo do tempo e até 24 meses após o início do manejo com remineralizador, cama de frango e plantas de cobertura, e que a qualidade dessas características pode ser alcançada até a profundidade de 0,20 m.

Em contrapartida, o comportamento verificado no CP2, referente ao P no solo, se manteve semelhante entre os períodos avaliados apenas da camada de 0,00-0,10 m, diferindo na camada de 0,10-0,20 m. Na camada mais superficial o P esteve diretamente relacionado aos tratamentos que envolveram a combinação tripla do remineralizador com a cama de frango e com os três consórcios, sendo que entre os tempos de avaliação a variação ocorreu apenas pelo consórcio que foi utilizado; enquanto que na camada abaixo de 0,10 m esse comportamento não se manteve, sobretudo para com a utilização do remineralizador de solo, que não se apresentou como fator determinante no comportamento do nutriente.

4 CONCLUSÕES

A análise de componentes principais indicou que entre os atributos químicos do solo avaliados, aqueles que melhor explicam a variabilidade dos tratamentos utilizados foram pH, H+Al, Ca, Mg, V% e P;

O P esteve mais relacionado aos tratamentos que associaram o remineralizador com a cama de frango e com os consórcios;

pH, Ca, Mg e V% apresentaram comportamento contrário ao verificado para o H+Al, sendo que a influência desses atributos não seguiu um padrão conforme o aumento do período de tempo de avaliação, variando também entre os diferentes tratamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolo desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.985-1002, 2003.

ALOVISI, A. M. T.; TAQUES, M. M.; ALOVISI, A. A.; TOKURA, L. K.; SILVA, R. S. da.; PIESANTI, G. H. L. M. Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. *Acta Iguazu*, Cascavel, PR, v.6, n.5, p.69-79, 2017.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.115-123, 2004a.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.359-367, 2004b.

AMPARO, A. Farinha de rocha e biomassa. **Agroecologia Hoje**, Botucatu, n.20, p.10-12, 2003.

ANDA, M.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Improving chemical properties of a highly weathered soil using finely ground basalt rocks. **Catena**, v.124, p.147-161, 2015.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2024.

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1003-1011, 2003.

ANDRADE, C. A. de.; BIBAR, M. P. S.; COSCIONE, A. R.; PIRES, A. M. M.; SOARES, Á. G. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.5, p.407-416, 2015.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.2, p.337-345, 2004.

ARAÚJO, R. M. **Uso de resíduos na agricultura familiar de base ecológica: efeitos na qualidade do solo e no desempenho agrônomo do feijoeiro**. 2018. 128p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2018.

BALOTA, E. L.; MACHINESKI, O.; HAMID, K. I. A.; YADA, I. F. U.; BARBOSA, G. M. C.; NAKATANI, A. S.; COYNE, M. S. Soil microbial properties after long-term swine slurry application to conventional and no-tillage systems in Brazil. **Science of the Total Environment**, v.490, p.397-404, 2014.

BASAK, B. B.; SARKAR, B.; BISWAS, D. R.; SARKAR, S.; SANDERSON, P.; NAIDU, R. Bio-intervention of naturally occurring silicate minerals for alternative source of potassium: challenges and opportunities. **Advances in Agronomy**, v.141, p.115-145, 2017.

BASSETTO JÚNIOR, N.; ALVES, G. H. T.; BELLETTINI, S.; BELLETTINI, N. M. T. Parcelamento de nitrogênio e inoculação das sementes com *Azospirillum brasilense* na cultura do milho. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.11, p.89544-89663, 2020.

BATISTA, N. T. F.; RAGAGNIN, V. A.; HACK, E.; GÖRGEN, A. L.; MARTINS, E. S. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de soja e sorgo submetido ao uso de basalto moído. In: Congresso Brasileiro de Rochagem, 03, Pelotas, 2017. **Anais**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017, p.241-247.

BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. **Hortaliças-fruto**. Maringá, PR: EDUEM, 2018. p.113-162.

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. v.1, cap.6, p.61-77.

BLANCO, I. B. **Adubação da cultura da soja com dejetos de suínos e cama de aviário**. 2015. 36p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2015.

BOARETTO, A. E.; LAVRES JUNIOR, J.; ABREU-JÚNIOR, C. H. Os desafios da nutrição mineral de plantas. In: PRADO, R. M.; WADT, P. G. S. **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. Jaboticabal, SP: FCAV/CAPEL, 2014. Cap.2.

BORGES, W. L. B.; FREITAS, R. S. de.; MATEUS, G. P.; SÁ, M. E. de.; ALVES, M. C. Absorção de nutrientes e alterações químicas em Latossolos cultivados com plantas de cobertura em rotação com soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.252-261, 2014.

BORGES, P. H. C.; SILVA, F. J. P. da.; CARVALHO, A. M. X. de. Avaliação da disponibilização de elementos nutrientes do pó de basalto via adubação verde de inverno e de feijão como cultura de verão. In: Congresso Brasileiro de Rochagem, 3, 2017, Pelotas, RS. **Anais**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Cerrados, 2017. p.269-274.

BORIN, A. L. D. C.; LANA, R. M. Q.; PEREIRA, H. S. Absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho doce cultivado em condições de campo. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.1591-1597, 2010.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790p.

BRASIL, E. C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.599-606, 1997.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. **Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, 2013.

BRASIL. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. **Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem,**

rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, 2016.

BRAY, R. H.; KURTZ, L. T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. **Soil Science**, v.59, n.1, p.39-45, 1945.

BRUNETTO, G.; COMIN, J. J.; SCHIMITT, D. E.; GUARDINI, R.; MEZZARI, C. P.; OLIVEIRA, B. S.; MORAES, M. P. de.; GATIBONI, L. C.; LOVATO, P. E.; CERETTA, C. A. Changes in soil acidity and organic carbon in a sandy typic hapludalf after medium-term pigslurry and deep-litter application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1620-1628, 2012.

BUSATO, J. G.; DOS SANTOS, L. F.; DE PAULA, A. M.; SODRÉ, F. F.; DE OLIVEIRA, A. L.; DOBBSS, L. B.; MARTINS, É. de S.; JINDO, K. Can co-application of silicate rock powder and humic-like acids increase nutrient uptake and plant growth in weathered tropical soil?. **Acta Agriculturae Scandinavica**, v.72, n.1, p.761-774, 2022.

CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **International Plant Nutrition Institute**, Piracicaba, SP. Informações agronômicas nº 141, 2013.

CALONEGO, J. C.; GIL, F. C.; ROCCO, V. F.; SANTOS, E. A. dos. Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, v.28, n.5, p.770-781, 2012.

CAMARGO, C. K.; RESENDE, J. T. V. de.; CAMARGO, L. K. P.; FIGUEIREDO, A. S. T.; ZANIN, D. S. Produtividade do morangueiro em função da adubação orgânica e com pó de basalto no plantio. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, n.1, p.2985-2994, 2012.

CANTARELLA, H.; JORIS, H. A. W.; SOARES, J. R.; VARGAS, V. P.; MONTEZANO, Z. F. Uso eficiente de fertilizantes na nutrição de plantas. In: PRADO, R. M. (Ed.). **Nutrição de Plantas**. Jaboticabal, SP: Funep, 2012. Cap.4, p.95-122.

CARVALHO, A. M. X. de. **Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas em manejo agroecológico**. 2012. 116p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CARVALHO, A. M. X. de. Rochagem: um novo desafio para o manejo sustentável da fertilidade do solo. In: SILVA, J. C. da.; SILVA, A. A. S.; ASSIS, R. T. de. **Sustentabilidade e inovações no campo**. Uberlândia: Compose, 2013. p.117-132.

CASTILHO, K. B.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; SALVIANO, A. M.; TRINDADE, M. H. Análise multivariada da qualidade química de um Latossolo sob sistemas de manejo do solo. **Revista Agrarian**, v.10, n.36, p.162-169, 2017.

CERETTA, C. A.; DURIGON, R.; BASSO, C. J.; BARCELLOS, L. A. R.; VIEIRA, F. C. B. Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.6, p.729-735, 2003.

CHAVES, A. P. Rotas tecnológicas convencionais e alternativas para a obtenção de fertilizantes. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da.; CASTILHOS, Z. C. (Eds). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2010. cap.3, p.45-60.

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Diagnóstico da seca no Paraná aponta prejuízos bilionários**. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/noticias/diagnostico-da-seca-no-parana-aponta-prejuizos-bilionarios>. Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

COELHO, A. M. **Nutrição e adubação do milho**. Circular Técnica nº 78. Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

COLA, G. P. A.; SIMÃO, J. B. P. Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Revista Verde**, Mossoró, v.7, n.1, p.01-08, 2012.

CONCEIÇÃO, L. T.; SILVA, G. N.; HOLSBACK, H. M. S.; OLIVEIRA, C. F.; MARCANTE, N. C.; MARTINS, É. S.; SANTOS, F. L. S.; SANTOS, E. F. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v.10, 2022.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A. do.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S.; SILVA, G. B. da. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.3, p.2018-224, 2008.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D. de.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; ANDRIGUETTI, M. H. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1291-1301, 2009.

CRUSCIOL, C. A. C.; MORO, E.; LIMA, E. V.; ANDREOTTI, M. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia-preta em plantio direto. **Bragantia**, v.67, n.2, p.481-489, 2008.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da.; CAMPOS, M. de.; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Broadcast application of ground silicate rocks as potassium sources for grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, 2022.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.35, n.3, p.271-276, 2013.

CURTIS, J. C. D.; LUCHESE, A. V.; MISSIO, R. F. Application of soil remineralizer to poultry litter as an efficient and sustainable alternative for fertilizing maize crop. **Journal of Plant Nutrition**, v.46, n.3, p.423-438, 2023.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G. de.; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017. cap.10, p.95-116.

DONG, Y.; YANG, J.; ZHAO, X.; YANG, S.; ZHANG, G. Contribution of different proton sources to the acidification of red soil with maize cropping in subtropical China. **Geoderma**, v.392, 2021.

DUARTE, A. P.; ABREU, M. F. de.; FRANCISCO, E. A. B.; GITTI, D. C.; BARTH, G.; KAPPES, C. Concentração e exportação de nutrientes nos grãos de milho. **Informações Agronômicas**, n.163, 2018.

DUARTE, A. P.; ABREU, M. F. de.; FRANCISCO, E. A. B.; GITTI, D. C.; BARTH, G.; KAPPES, C. Reference values of grain nutrient content and removal for corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, 2019.

EMAMGOLIZADEH, S.; BATENI, S. M.; SHAHSAVANI, D.; ASHRAFI, T.; GHORBANI, H. Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). **Journal of Hydrology**, v.529, p.1590-1600, 2015.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Relatório técnico anual do centro de pesquisa agropecuária dos cerrados: 1980-1981**. Brasília, DF: EMBRAPA-CPAC, 1982. 163p.

ERICH, M. S.; FITZGERALD, C. B.; PORTER, G. A. The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.88, p.79-88, 2002.

ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. de.; TEIXEIRA, M. G.; URQUIAGA, S. Decomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.321-328, 2006.

FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L. de.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, C. M. de.; GUARÇONI, R. C. Atributos químicos do solo com diferentes plantas de cobertura em sistema de plantio direto orgânico. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.5, n.2, p.19-28, 2015.

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; COSTA, L. M.; ALVARENGA, R. C.; NEVES, J. C. L. Crescimento e acúmulo de nutrientes por plantas espontâneas e por leguminosas utilizadas para adubação verde. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.171-177, 2000.

FERREIRA, E. R. N. C.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L. Pó de basalto, desenvolvimento e nutrição do feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) e propriedades químicas de um Cambissolo Húmico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages v.8 n.2, p.111-121, 2009.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v.38, n.2, p.109-112, 2014.

FIGUEIREDO, C. C. de.; RAMOS, M. L. G. Biomassa microbiana do solo e produção de alface em função da dose de N e adubo orgânico. **Bioscience Journal**, v.25, n.3, p.9-15, 2009.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v.40, n.4, p.369-379, 2016.

FIXEN, P. E. World fertilizer nutrient reserves: a view to the future. **Better Crops**, v.93, n.3, p.8-11, 2009.

FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, n.13, p.2045-2058, 2003.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUNECENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca** (Documentos nº 314). Embrapa Soja, Londrina, PR, 2009.

FREDDI, O. S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.953-961, 2008.

FURLANI, A. M. C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Koogan, 2004. cap.2, p.40-75).

FYFE, W. S.; LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, n.4, p.715-720, 2006.

GARCIA, R. G.; PAZ, I. C. L. A.; CALDARA, F. R.; NÄÄS, I. A.; FREITAS, L. W.; BORILLE, R.; ROYER, A. F. B.; SANTANA, M. R. de. Alternativas para a composição de cama de frango. **Revista Agrarian**, v.6, n.19, p.81-89, 2013.

GILLMAN, G. P.; BURKETT, D. C.; COVENTRY, R. J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. **Australian Journal of Soil Research**, v.9, p.799-811, 2001.

GILLMAN, G. P.; BURKETT, D. C.; COVENTRY, R. J. Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. **Applied Geochemistry**, v.17, n.8, p.987-1001, 2002.

GLOBALFERT. **Inovação e boas práticas em nutrição vegetal**. 2023. Disponível em: <https://globalfert.com.br/pdf/outlook-globalfert-2023.pdf>

GOLFETTO, P. **Uso do fonolito para reposição do potássio exportado com a colheita de grãos e biomassa**. 2016. 42p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GOMES, J. A.; SCAPIM, C. A.; BRACCINI, A. L.; VIDIGAL FILHO, P. S.; SAGRILO, E.; MORA, F. Adubações orgânica e mineral, produtividade do milho e características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.27, n.3, p.521-529, 2005.

GOTZ, L. F.; CASTAMANN, A.; PIOVESAN, F.; ANZOLIN, B. L.; HEREK, T. A.; MIKOANSKI, W. M.; RITA, Y. L. Use of rock powder associated with bovine manure in Latossolo Vermelho cultivated with wheat. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.9, n.2, p.131-139, 2019.

GUIMARÃES, G.; LANA, R. P.; REI, R. S.; VELOSO, C. M.; SOUSA, M. R. M.; RODRIGUES, R. C.; CAMPOS, S. A. Produção de cana-de-açúcar adubada com cama de frango. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.4, p.617-625, 2016.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.43, n.2, p.189-202, 2005.

HAIR JUNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2009.

HANISCH, A. L.; FONSECA, J. A. da.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SPAGNOLLO, E. Efeito de pó de basalto no solo e em culturas anuais durante quatro safras, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v.3, n.2, p. 100-107, 2013.

HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.11-36, 2000.

HEIZ, R.; GARBIATE, M. V.; VIEGAS, A. L.; MOTA, L. H. S.; CORREIA, A. M. P.; VITORINO, A. C. T. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de crame e de nabo-forrageiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v.41, n.9, p.1549-1555, 2011.

HEREK, T. A. **Atributos químicos do solo e rendimento de grãos do trigo em solo submetido a diferentes doses de cama de frango**. 2018. 28p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, RS, 2018.

HINSINGER, P.; BARROS, O. N. F.; BENEDETTI, M. F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock: Experimental evidence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.65, n.1, p.137-152, 2001.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. de. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v.1, n.5, p.83-90, 2015.

HUBNER, V. **Alterações em atributos químicos de solos após aplicação de cama de aviário**. 2023. 34p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2023.

IDR-PR - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. **Boletim Agrometeorológico**. Curitiba, PR: IDR, 2022. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Boletim-Agrometeorologico>. Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

IMAIZUMI, C.; ROSSI, R.; FORTES, L. **Potencialidades do dunito como fonte de silício e magnésio para a agricultura**. 2018. Disponível em: <https://cmagfert.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Dunito-CMAG-Fertilizantes.pdf>.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.) **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p.573-610.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p.333-379.

KAMPRATH, E. J.; WATSON, M. E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLES, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Coords.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.433-469.

KRAHL, L. L.; PAZ, S. P. A. da.; ANGÉLICA, R. S.; VALADARES, L. F.; SOUZA-SILVA, J. C.; MARCHI, G.; MARTINS, É. S. Successive off take of elements by maize grown in pure basalt powder. **African Journal of Agricultural Research**, v.15, n.2, p.229-239, 2020.

KRAHL, L. L.; VALADARES, L. F.; SOUSA-SILVA, J. C.; MARCHI, G.; MARTINS, É. S. Dissolution of silicate minerals and nutrient availability for corn grown successively. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, 2022.

KURIHARA, C. H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional**. 2004. 101p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

KURIHARA, C. H.; VENEGAS, V. H. A.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. **Revista Ceres**, v.60, n.5, p.690-698, 2013.

LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R.; RICHART, A.; FONTANIVA, S. **Análise química de solo e de tecido vegetal: metodologias analíticas**. 2.ed. Cascavel, PR: EDUNIOESTE, 2016.

LANDEWEERT, R.; HOFFLAND, E.; FINLAY, R. D.; KUYPER, T. W.; BREEMEN, N. V. Linking plants to rocks: ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals. **Trends in Ecology & Evolution**, v.16, n.5, p.248-254, 2001.

LANGE, A.; CAVALLI, E.; PEREIRA, C. S.; CHAPLA, M. V.; FREDDI, O. S. Relações cálcio: magnésio e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. **Nativa**, v.9, n.3, p.294-301, 2021.

LAVORATO, M. P.; BRAGA, M. J. Custos de produção da soja no sistema convencional e no de precisão em Mato Grosso do Sul. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v.26, n.3, 30p, 2017.

LI, J.; ZHANG, W.; LI, S.; LI, X.; LU, J. Effects of citrate on the dissolution and transformation of biotite, analyzed by chemical and atomic force microscopy. **Applied Geochemistry**, v.51, p.101-108, 2014.

LIMA, J. J. de.; MATA, J. D. V. da.; PINHEIRO NETO, R.; SCAPIM, C. A. Influência da adubação orgânica nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico e na produção de matéria seca de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, p.715-719, 2007.

LIMA, C. C. Disponibilidade de fósforo para a cana-de-açúcar em solo tratado com compostos orgânicos ricos em silício. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1222-1227, 2011.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. da. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.1, p.16-23, 2013.

LIVI, A.; CASTAMANN, A. Uso de pó de rocha, termofosfato e adubo orgânico na produção de hortaliças. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.10, n.10, p.10-20, 2016.

LOURENZI, C. R.; CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da.; GIROTTO, E.; LORENSINI, F.; TIECHER, T. L.; DE CONTI, L.; TRENTIN, G.; BRUNETTO, G. Nutrients in soil layers under no-tillage after successive pig slurry applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.1, p.157-167, 2013.

LOURENZI, C. R.; SCHERER, E. E.; CERETTA, C. A.; TIECHER, T. L.; CANCIAN, A.; FERREIRA, P. A. A.; BRUNETTO, G. Atributos químicos de Latossolo após sucessivas aplicações de composto orgânico de dejetos líquido de suínos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.3, p.233-242, 2016.

LUCHESI, A. V.; PIVETTA, L. A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F.; GIARETTA, A. P. S.; CURTIS, J. C. D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, v.17, n.3, p.487-497, 2021.

LUCHESI, A. V.; LEITE, I. J. G. C.; ALVES, M. L.; VIECELI, J. P. S.; PIVETTA, L. A.; MISSIO, R. F. Can basalt rock powder be used as an alternative nutrient source for soybeans and corn?. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.23, p.4044-4054, 2023.

LYRA, W. S.; SILVA, E. C. da.; ARAÚJO, M. C. U. de.; FRAGOSO, W. D. Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. **Química Nova**, v.33, n.7, p.1594-1597, 2010.

MAGALHÃES, W. A.; MEGAIOLI, T. G.; FREDDI, O. S.; SANTOS, M. A. dos. Quantificação de nutrientes em sementes de soja. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.13, n.2, p.95-100, 2015.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R. da.; NEVES, J. C. L.; SILVA, M. F. O. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1690-1702, 2015.

MANNING, D. A. C.; BAPTISTA, J.; LIMON, M. S.; BRANDT, K. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. **Science of the Total Environment**, v.574, n.1, p.476-481, 2017.

MARTINS, E. S.; RESENDE, A. V.; OLIVEIRA, C. G.; FURTINI NETO, A. E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da.; CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2010. cap 5, p.89-104.

MARTINS, V.; GONÇALVES, A. S. F.; MARCHI, G.; GUILHERME, L. R. G.; MERTINS, E. S. Solubilização de potássio em misturas de verdete e calcário tratadas termoquimicamente. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, n.1, p.66-72, 2015.

MASUD, M. M.; BAQUY, M. A.; AKHTER, S.; SEN, R.; BARMAN, A.; KHATUN, M. R. Liming effects of poultry litter derived biochar on soil acidity amelioration and maize growth. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.202, 2020.

MEDEIROS, F. de P.; DE CARVALHO, A. M. X.; RAMOS, C. G.; DOTTO, G. L.; CARDOSO, I. M.; THEODORO, S. H. Rock powder enhances soil nutrition and coffee quality in agroforestry systems. **Sustainability**, v.16, n.354, 2024.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M.; PINTO, L. F. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos Básicos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. cap.4.

MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; DIAS, F. O.; BARBOSA, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, v.42, n.4, p.471-476, 2012.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, PR, v.4, p.435-454, 2015.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. 6.ed. Porto Alegre, RS: EVANGRAF. 2017. 266p.

MEURER, E. J.; TIECHER, T.; MATTIELLO, L. Potássio. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de.; SANTOS, L. A. (Eds). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: SBCS, 2018. cap. 12, p.429-464.

MICHELON, C. J.; JUNGES, E.; CASALI, C. A.; PELLEGRINI, J. B. R.; ROSA, L.; OLIVEIRA, Z. B. de.; OLIVEIRA, M. B. de. Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, SC, v.18, n.2, p.230-239, 2019.

MORETI, D.; ALVES, M. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; CARVALHO, M. P. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasília, v.31, p.167-175, 2007.

MOURA, C. M. de. **Atributos químicos do solo e rendimentos de cultivos em experimento de longa duração cultivado com níveis de calcário e de cama de aviário aplicados em superfície**. 2022. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2022.

NASCIMENTO, M.; LOUREIRO, F. E. L. **Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas**. Rio de Janeiro, RJ: CETEM/MCT, 2004.

NEUMANN, G.; ROMHELD, V. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Mineral Nutrition of Higher Plants**, 3.ed. Academic Press, 2012.

NING, Q.; CHEN, L.; JIA, Z.; ZHANG, C.; MA, D.; LI, F.; ZHANG, J.; LI, D.; HAN, X.; CAI, Z.; HUANG, S.; LIU, W.; ZHU, B.; LI, Y. Multiple long-term observations reveal a strategy for soil pH-dependent fertilization and fungal communities in support of agricultural production. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.293, 2020.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. 1. ed. Londrina, PR: Instituto Agronômico do Paraná, 2019. 210p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1.ed. Viçosa, MG: UFV/DPS, 1999. 399 p.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de.; CASTRO, C. de.; OLIVEIRA, F. A. de.; JORDÃO, L. T. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **International Plant Nutrition Institute**, n.143, 2013.

OLIVEIRA, J. C. S. de. **Indicadores de qualidade do solo após quatro anos de aplicações sucessivas de resíduos orgânicos**. 2019. 74p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2019.

OREOLUWA, A. T.; YETUNDE, A. T.; JOSEPH, U. E.; CHENGSEN, Z.; HONGYAN, W. Effect of biochar and poultry litter application on chemical properties and nutrient availability of an acidic soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.51, n.12, p.1670-1679, 2020.

OSTERROHT, M. V. Rochagem para quê? **Revista Agroecologia Hoje**, n.20, p.12-15, 2003.

OVIEDO-RONDÓN, E. O. Tecnologias para mitigar o impacto ambiental na produção de frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, p.239-252, 2008.

PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. A.; ASSIS, R. L. de.; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.9, p.1228-1236, 2013.

PÁDUA, E. J. de. **Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas**. 2012. 91p. Dissertação (Mestrado em ciência do solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

PALMA, P.; MARTINS, I.; CATARINO, A.; MOURINHA, C.; ALVARENGA, P.; DORES, J.; PATANITA, M.; TOMAZ, A. Uma abordagem integrada na avaliação da qualidade de solos agrícolas em parcelas regadas. **Agrotec**, p.64-67, 2020.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2.ed. Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.82-83, 2019.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.3, p.911-920, 2008.

PETREIRE, C.; ANGHINONI, I. Alterações de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.885-895, 2001.

PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NÓBREGA, J. C. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; COSTA, J. A. da.; Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1591-1600, 2012.

PRIETZEL, J.; KLYSUBUN, W.; HURTARTE, L. C. C. The fate of calcium in temperate forest soils: a Ca K-edge XANES study. **Biogeochemistry**, v.152, p.195-222, 2021.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres/Potafos, 1991. 343p.

RATKE, R. F.; ANDRADE, T. G.; ROCHA, S. G. da.; SOUZA, A. de.; DAI, P. V. S.; SILVA-FILHO, E. C. da.; BERTOLINO, S. C.; ZUFFO, A. M.; OLIVEIRA, A. M. de.; AGUILERA, J. G. Pós de rochas regionais como fonte de fósforo e potássio para plantas. **Research, Society and Development**, v.9, n.7, p.1-22, 2020.

RESENDE, Á, V. de.; MACHADO, C. T.; MARTINS, E. S.; SENA, M. C.; NASCIMENTO, M. T.; SILVA, L. C. R.; LINHARES, N. W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Espaço e Geografia**, v.9, p.135-161, 2006.

RESENDE, A. V. de.; COELHO, A. M.; SANTOS, F. C. dos.; LACERDA, J. J. J. **Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central**. Circular Técnica nº 181. Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

RESENDE, Á, V. de.; BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; ABREU, S. C.; SANTOS, F. C. dos.; COELHO, A. M. Manejo de nutrientes no cultivo de milho segunda safra na região do cerrado. **Plantio Direto**, v.166, 2018.

RIBEIRO, L. S.; SANTOS, A. R. dos.; SOUZA, L. F. S.; SOUZA, J. S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.891-897, 2010.

RIBEIRO, G. M. **Caracterização de pós de rochas silicáticas, avaliação da solubilidade em ácidos orgânicos e potencial de liberação de nutrientes como remineralizadores de solos agrícolas**. 2018. 107p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2018.

RIBEIRO, L. L. O. **Efeito do pó de rocha de basalto, cama de frango e esterco bovino nos atributos químicos do solo, teores de nutrientes foliares e produtividade da soja e milho segunda safra**. 2023. 76p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, PR, 2023.

RITCHIE, G. S. P; DOLLING, P. J. The role of organic matter in soil acidification. **Australian Journal of Soil Research**, v.23, p.569-576, 1985.

ROCHA NETO, A. R. da. **Solubilização de pó de fonolito em Latossolo Vermelho distroférico por ação de poáceas cultivadas como plantas de cobertura**. 2020. 45p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, SP, 2020.

RONTANI, F. A. **Qualidade química e ciclagem de nutrientes em plantas de cobertura de inverno**. 2020. 56p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS, 2020.

ROSOLEM, C. A.; GARCIA, R. A.; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. Lixiviação de potássio no solo de acordo com suas doses aplicadas sobre palha de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.813-819, 2006.

SÁ, J. C. M.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C.; VIEIRA, A. M.; FIGUEIREDO, A. G. Extração de nutrientes e produtividade de genótipos de milho afetados por níveis de palha. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.4, p.715-722, 2011.

SÁ, A. A. S. de.; OLIVEIRA, G. H. de.; SILVA, R. P. da.; ASSIS, V. C. S. S. de.; OLIVEIRA, C. S. de.; OLIVEIRA, J. A. de.; CASAMASSA, M. T.; BERTI, M. P. S. A importância do cálcio para nutrição de plantas. **Scientific Electronic Archives**, v.17, n.2, 2024.

SALVAGIOTTI, F.; MAGNANO, L.; ORTEZ, O.; ENRICO, J.; BARRACO, M.; BARBAGELATA, P.; CONDORI, A.; DI MAURO, G.; MANLLA, A.; ROTUNDO, J.; GARCIA, F. O.; FERRARI, M.; GUDELJ, V.; CIAMPITTI, I. Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. **European Journal of Agronomy**, v.127, 2021.

SANDIM, A. S.; BÜLL, L. T.; FURIM, A. R.; LIMA, G. S.; GARCIA, J. L. N. Phosphorus availability in oxidic soils treated with lime and silicate applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.38, n.4, p.1215-1222, 2014.

SANTOS, D. R. dos.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

SANTOS, L. B. dos.; CASTAGNARA, D. D.; BULEGON, L. G.; ZOZ, T.; OLIVEIRA, P. S. R. de.; GOLÇALVES JÚNIOR, A. C.; NERES, M. A. Substituição da adubação nitrogenada mineral pela cama de frango na sucessão aveia/milho. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.272-281, 2014.

SANTOS, H. G. dos.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos.; OLIVEIRA, V. Á. De.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de.; ARAÚJO FILHO, J. C. de.; OLIVEIRA, J. B. de.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, R. A. **Avaliação da capacidade de troca de cátions (CTC) em pó de rocha e solo que recebeu aplicação**. 2020. 74p. Dissertação (Mestrado em ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2020.

SANTOS, L. J. dos. **Polihalita como fonte de potássio na adubação do sistema de sucessão soja-milho**. 2021. 24p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Verde, GO, 2021.

SARTO, M. V. M.; LANA, M. C.; RAMPIM, L.; ROSSET, J. S.; SARTO, J. R. W.; BASSEGIO, D. Effects of calcium and magnesium silicate on the absorption of silicon and nutrients in wheat. **Semina: Ciências Agrárias**, v.40, n.1, p.67-80, 2019.

SCHALLEMBERGER, J. B.; MATSUOKA, M.; PAVEGLIO, S. S.; LAZZARETTI, G.; BETTIO, I.; ROSA, C. O. da. Efeito da utilização da cama de aviário como adubo orgânico na qualidade química e microbiológica do solo. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v.42, n.1, p.580-592, 2019.

SCHIMIDT, F.; KNOBLAUCH, R. Extended use of poultry manure as a nutrient source for flood-irrigated rice crop. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, 2020.

SIEDT, M.; SCHAFFER, A.; SMITH, K. E. C.; NABEL, M.; ROB-NICKOLL, M.; DONGEN, J. T. V. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. **Science of the Total Environment**, v.751, 2021.

SILVA, A. F.; LAZARINI, E. Doses e épocas de aplicação de potássio na cultura da soja em sucessão a plantas de cobertura. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.1, p.179-192, 2014.

SILVA, E. A. da.; CASSIOLATO, A. M. R.; MALTONI, K. L.; SCABORA, M. H. Efeitos da rochagem e de resíduos orgânicos sobre aspectos químicos e microbiológicos de um subsolo exposto e sobre o crescimento de *Astronium fraxinifolium*. **Revista Árvore**, v.32, n.2, p.323-333, 2008.

SILVA, F. F. da. **Sistema de visão artificial para a identificação da nutrição de milho submetido a níveis de cálcio, magnésio e enxofre**. 2011. 143p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, SP, 2011.

SILVA, A. da.; ALMEIDA, J. A.; SCHMITT C.; AMARANTE, C. V. T. do. Fertilidade do solo e desenvolvimento de feijão comum em resposta a adubação com pó de rocha. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, n.4, p.548-554, 2012.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. **Revista Ceres**, v.59, n.2, p.271-277, 2012.

SILVA, D. R. G.; SPEHAR, C. R.; MARCHI, G.; SOARES, D. A.; CANCELLIER, E. L.; MARTINS, É, S. Yield, nutrient uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.4, p.455-464, 2014.

SILVA, R. C.; CURY, M. E.; IEDA, J. J. C.; SERMARINA, R. A.; AZEVEDO, A. C. Chemical attributes of a remineralized Oxisol. **Ciência Rural**, v.47, p.1-10, 2017.

SILVEIRA, R. T. G. da. **Uso de rochagem pela mistura de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizante natural de solos tropicais lixiviados**. 2016. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

SOUZA, D. M. G. de.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do cerrado**. Encarte do Informações Agronômicas nº 102. 2003.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n.1, p.133-139, 2003.

SOUZA, M. D. B. de.; FONTANETTI, A.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C. Efeito de remineralizador, vinhaça e plantas de cobertura nos atributos químicos do solo. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, v.5, n.1, p.1-7, 2017.

TABOLKA, C. L. **Características químicas do solo e desempenho de culturas após quatro anos de aplicações de cama de aviário em diferentes épocas e níveis**. 2016. 75p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAVARES, L. F.; CARVALHO, A. M. X. de.; CAMARGO, L. G. B.; PEREIRA, S. G. F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v.7, p.89-98, 2018.

TAVEIRA, J. H. S.; ATAÍDE, M. V.; ROCHA, M. P.; FREITAS, N. F. de.; PRADO, S. M. A. Importância dos remineralizadores na produção de milho para silagem. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.3, p.24907-24919, 2021.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, n.4, p.715-720, 2006.

THEODORO, S. H.; TCHOUANKOUE, J. P.; GONÇALVES, A. O.; LEONARDOS, O.; HARPER, J. A importância de uma rede tecnológica de rochagem para a sustentabilidade em países tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v.5, n.6, p.1390-1407, 2012.

TOKURA, A. M.; FUTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; SANTOS, J. Z. L.; ALOVISI, A. A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.1, p.171-179, 2011.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.3, p.421-428, 2008.

TOSCANI, R. G. S.; CAMPOS, J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. **Geociências**, v.36, n.2, p.259-274, 2017.

VAN STRAATEN, P. Rochas e minerais como fertilizantes alternativos na agricultura: uma experiência internacional. In: FERNANDES, F. R.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. (Eds). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap.13, p.235-264.

VARGAS, R. L. de.; SCHUCH, L. O. B.; BARROS, W. S.; RIGO, G. A.; SZARESKEI, V. J.; CARVALHO, I. R.; PIMENTEL, J. R.; TROYJACK, C.; JAQUES, L. B. A.; SOUZA, V. Q.

de.; ROSA, T. C. da.; AUMONDE, T. Z.; PEDÓ, T. Macronutrients and micronutrient variability in soybean seeds. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.4, p.209-222, 2018.

VASCONCELLOS, C. A.; VIANA, M. C. M.; FERREIRA, J. J. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em milho cultivado no período inverno – primavera. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.11, p.1835-1845, 1998.

VIOLA, R.; BENIN, G.; CASSOL, L. C.; PINNOW, C.; FLORES, M. F.; BORNHOFEN, E. Adubação verde e nitrogenada na cultura do trigo em plantio direto. **Bragantia**, v.72, n.1, p.90-100, 2013.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. A. R.; REIS, M. C. dos. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, n.2, p.157-173, 2009.

WANG, H. Y.; SHEN, Q. H.; ZHOU, J. M. Plants use alternative strategies to utilize nonexchangeable potassium in minerals. **Plant Soil**, v.343, p.209-220, 2011.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2297-2305, 2008.

WHALEN, J. K.; CHANG, C.; CLAYTON, G. W.; CAREFOOT, J. P. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.962-966, 2000.

WIHARDJAKA, A.; HARSANTI, E. S.; ARDIWINATA, A. N. Effect of fertilizer management on potassium dynamics and yield of rainfed lowland rice in Indonesia. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.82, n.1, p.33-43, 2022.

WRITZL, T. C.; CANEPELLE, E.; STEIN, J. E. S.; KERKHOFF, J. T.; STEFFLER, A. D.; SILVA, D. W. da.; REDIN, M. Produção de milho pipoca com uso do pó de rocha de basalto associado à cama de frango em latossolo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.9, n.2, p.101-109, 2019.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil & Tillage Research**, v.205, 2021.

ANEXOS

ANEXO A – Aplicação manual dos insumos



ANEXO B – Consórcios de plantas de cobertura



ANEXO C – Manutenção dos tratamentos adicionais (testemunhas) durante o período de inverno



Anexo D – Manejo dos consórcios de plantas de cobertura

