

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA AGROPASTORIL COM
APLICAÇÃO DE AGROMINERAL SILICÁTICO

Pedro Henrique Gatto Juliano
Engenheiro Agrônomo

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA AGROPASTORIL COM
APLICAÇÃO DE AGROMINERAL SILICÁTICO

Pedro Henrique Gatto Juliano

Orientador: Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Coorientador: Dr. Wander Luis Barbosa Borges

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

2023

J94q

Juliano, Pedro Henrique Gatto

Qualidade do solo em sistema agropastoril com aplicação de agromineral silicático / Pedro Henrique Gatto Juliano. -- Jaboticabal, 2023

84 p.

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

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Coorientador: Wander Luis Barbosa Borges

1. Agrominerais. 2. Fertilizantes. 3. Saúde do solo. 4. Urochloa brizantha. 5. Zea mays L.. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial dessa pesquisa

O entendimento da aplicação de agromineral silicático como remineralizador de solo em sistema agropastoril permite o desenvolvimento de estratégias de manejo eficientes com base na produtividade das culturas. Todavia, ainda que tenham efeitos positivos no solo, tais produtos não devem ser utilizados em substituição ao gesso, calcário e fertilizantes minerais.

Potential impact of this research

Understanding the application of silicate agromineral as a soil remineralizer in agropastoral system allows the development of efficient management strategies based on crop productivity. However, even though they have positive effects on the soil, such products should not be used as a substitute for gypsum, limestone, and mineral fertilizers.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA AGROPASTORIL COM APLICAÇÃO DE AGROMINERAL SILICÁTICO

AUTOR: PEDRO HENRIQUE GATTO JULIANO

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

COORDENADOR: WANDER LUÍS BARBOSA BORGES

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

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 07/07/2023 19:02:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Associado REGES HEINRICHS (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAT UNESP Dracena

Documento assinado digitalmente
 REGES HEINRICHS
Data: 10/07/2023 08:45:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. GUSTAVO PAVAN MATEUS (Participação Virtual)
Departamento de Descentralização do Desenvolvimento / Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - APTA

Documento assinado digitalmente
 GUSTAVO PAVAN MATEUS
Data: 10/07/2023 16:58:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 04 de julho de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

PEDRO HENRIQUE GATTO JULIANO, nascido em Votuporanga – SP, Brasil, em 11 de junho de 1997, filho de Giovani Gil Gatto Juliano e Olivaldo José Juliano. Possui título de Técnico em contabilidade (2013) e graduação em Engenharia Agrônômica (2020) pelo Centro Universitário de Votuporanga – UNIFEV, além de Especialização (2021) em Georreferenciamento em Imóveis Rurais pelo Instituto Superior de Educação Elvira Dayrell - ISEED / Faculdade dos Vales Elvira Dayrell - FAVED. Durante a graduação, foi bolsista de iniciação científica CNPq no período de 2017 a 2020, realizando pesquisas na área de Produção Vegetal e Melhoramento Genético, além de ter participado de projetos de extensão. Em março de 2021, iniciou o curso de mestrado em Agronomia pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira e coorientação do pesquisador Dr. Wander Luis Barbosa Borges. Durante o mestrado, participou de projetos relacionados com a Qualidade do Solo, Sistemas Sustentáveis de Produção Agropecuária, Uso e Manejo de Resíduos na Agricultura, Nutrição e Adubação de Plantas e Agricultura de Precisão. É coautor de artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais de alto impacto. É membro do Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo da Unesp (GENAFERT).

A palavra "desistir" não existe no dicionário de um sonhador.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Olivaldo e Giovani, e à minha irmã Mariana Gatto Juliano, que além de ser meu alicerce, são meus maiores amigos e os meus verdadeiros parceiros nesta jornada chamada vida.

Ao meu querido avô Geraldo Gatto (*in memoriam*), que me ensinou desde cedo a não me curvar diante das imposições da sociedade e a perseguir meus sonhos com determinação. Sua memória continua a me inspirar e guiar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve à frente dos meus passos, agradeço por guiar e proteger meu caminho, fortalecendo minha fé e inspirando-me a seguir em frente a cada nova manhã. As pessoas que entraram em minha vida, que abriram portas para lugares e oportunidades que eu nunca imaginei e me ajudaram a ser quem sou hoje.

Aos meus queridos pais, vocês sempre me apoiaram com amor, sabedoria e dedicação, incentivando-me a persistir em meus sonhos e a buscar novas oportunidades de crescimento pessoal e profissional. A minha irmã Mariana, obrigado por compartilhar comigo as suas experiências e sempre me apoiar emocionalmente, mesmo nas situações mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, por todo aprendizado e ensinamentos durante esses anos. Por sua paciência em repassar todo o seu conhecimento e por ter se tornado um exemplo de profissional e dedicação. Obrigado por todas as oportunidades que colocou em meu caminho.

Ao meu coorientador Dr. Wander Luis Barbosa Borges, que foi uma pessoa essencial para a conclusão de mais essa etapa. Minha admiração pelo senhor é imensurável. Obrigado por tudo que tem feito por mim, por ter acreditado em meu potencial, por confiar nos projetos em que ajudei a conduzir e mais do que isso por me mostrar o quão amplo é o mundo da pesquisa, desde os estágios, mestrado até os bons momentos da vida.

Aos amigos e anjos que sempre pude contar. Em especial, a Naina Belila, que sempre me incentivou a iniciar esta nova fase da vida, acreditando em todo o processo.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo do Câmpus de Jaboticabal – UNESP, que sempre se empenharam e se dedicaram a nos ensinar e repassar todas as suas experiências para crescermos como profissionais.

Ao Diretor Prof. Dr. Antonio Sergio Ferraud e à Vice-Diretora Profa. Dra. Janete Aparecida Desiderio da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias –

UNESP, pela oportunidade que me foi dada e por tornarem possível a execução de meu trabalho.

À toda Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, pelo empenho, aprendizado, dedicação e amor incondicional ao Programa. Aos Funcionários da Seção de Pós-graduação, por toda a dedicação e atenção que sempre nos foi dada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – BRASIL (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo).

Ao IAC (Centro Avançado de Pesquisa e Desenvolvimento de Seringueira e Sistemas Agroflorestais) de Votuporanga – SP, pela disponibilização da área e aporte de funcionários e equipamentos utilizados no experimento. Agradeço o apoio e contribuição de toda equipe de pesquisadores, técnicos e estagiários na condução das atividades de campo. Obrigado meus amigos Helimar Balarone, Luan Pianta, Letícia Rodrigues, Douglas Osaki, Isabela Malaquias, e todos que participaram da condução do experimento.

A Empresa Noromix Concreto S/A - Mineração Grandes Lagos LTDA, por financiar o projeto de pesquisa.

A Embrapa Cerrados, que por meio da pesquisadora Dra. Iêda de Carvalho Mendes possibilitou a nova tecnologia BioAS.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), por todo apoio. Em especial, a Eliane Nascimento e Nathercia Elias por me apoiarem nos momentos mais difíceis.

Aos responsáveis pelos Laboratórios de Fertilidade do Solo, Nutrição de Plantas e Bromatologia da Faculdade de Engenharia – Câmpus de Ilha Solteira, Prof. Marcelo Andreotti, Prof. Marcelo Minhoto, Prof. Rafael Bonilha e Dra. Viviane Modesto. Aos técnicos: Marcelo Rinaldi, Carlos Araújo (Carlinhos), Silvia Adriana e Sidival Carvalho.

E, a todos que participaram desta pesquisa, de forma direta ou indireta, para que se tornasse possível a concretização do mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 Sistema agropastoril	8
2.2 Corretivos, condicionadores e remineralizadores de solos.....	9
2.3 Qualidade do solo	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Descrição do local, caracterização do solo e culturas	14
3.2 Histórico da área experimental	15
3.3 Delineamento experimental e tratamentos	16
3.4 Caracterização do agromineral silicático.....	16
3.5 Instalação e desenvolvimento do experimento	19
3.6 Variáveis avaliadas	21
3.6.1 Solo	21
a) Indicadores físicos do solo	21
b) Indicadores químicos do solo.....	22
c) Indicadores biológicos do solo	22
d) Índice de qualidade biológico	23
3.6.2 Planta.....	23
a) Milho 2021/22	23
3.7 Análise estatística	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Indicadores físicos do solo	25
4.2 Indicadores químicos do solo.....	28
4.3 Indicadores biológicos do solo e BioAS	44
4.4 Avaliações das culturas	47
4.4.1 Teores de macro e micronutrientes na folha de milho.....	47
4.4.2 Desenvolvimento das plantas, componentes de produção e produtividade	50
4.5 Produtividade do milho e produção da fitomassa do capim-marandu	51

4.6 Exportação de nutrientes nos grãos de milho	53
4.7 Acúmulo de nutrientes na parte aérea do capim-marandu	54
4.8 Correlações	55
5. CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS.....	63
ANEXOS	74

QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA AGROPASTORIL COM APLICAÇÃO DE AGROMINERAL SILICÁTICO

RESUMO – Pesquisas sobre o uso de agromineral silicático (AS) como remineralizador de solos em sistema de produção agropastoril (SAP) ainda são incipientes. Objetivou-se, com este estudo, avaliar a aplicação do uso de um AS, associado ou não à utilização de insumos (I), monitorando a qualidade de um solo em SAP, e avaliar o desenvolvimento, componentes de produção e produtividade do milho e a produtividade de biomassa da capim-marandu. Para tal, um experimento foi realizado por dois anos em condições de campo. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições e esquema fatorial 3 x 2, sendo: três doses de AS (0; 5000 e 10000 kg ha⁻¹) e dois modos de aplicação (com e sem I). Os tratamentos com aplicação de I foram T1 – adubação mineral convencional, calagem e gessagem (AM+C+G); T2 – AM+C+G+5000 kg ha⁻¹ de AS; T3 – AM+C+G+10000 kg ha⁻¹ de AS e sem I foram T4 – 0 kg ha⁻¹ de AS; T5 – 5000 kg ha⁻¹ de AS; e, T6 – 10000 kg ha⁻¹ de AS. Os indicadores físicos do solo MA, MI e DS foram avaliados nas camadas de 0–0,1 m e 0,1–0,2 m. Os indicadores químicos pH, MO, CTC, H+Al, SB, V, Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn foram avaliados nas camadas de 0–0,05; 0,05–0,1; 0,1–0,2 e 0,2–0,4 m e os indicadores biológicos (enzimas arilsulfatase e β -glicosidase) e IQSFertbio (BioAS) foram avaliados na camada de 0–0,1 m. Nas culturas foram avaliados: estado nutricional, componentes de produção, produtividade de grãos do milho e a produção e acúmulo de nutrientes da fitomassa seca do capim-marandu. Para os indicadores físicos do solo houve interação entre as doses de AS e I para PT e DS na camada 0,1–0,2 m, no ano de 2022, onde os tratamentos com I apresentaram os maiores valores de PT e menores de DS. Para os indicadores químicos houve interação entre as doses de AS e I na camada 0,0–0,05 m para MO, SB, CTC e S, no ano de 2021 e para Al, SB, S e Cu em 2022. Na camada de 0,05–0,1 m, houve interação para CTC no ano de 2021 e SB, V e Zn em 2022. Na camada 0,1–0,2 m, apenas a SB no ano de 2022 apresentou interação. De modo geral, os insumos proporcionaram maiores valores para os indicadores físicos e químicos, no qual o T3 apresentou os maiores teores de Ca, Mg, S e Zn. A atividade enzimática do solo não apresentou interação em ambos os anos avaliados, além disso o índice de qualidade do solo (BioAS) manteve-se na classe alto para todos os tratamentos avaliados. As avaliações da cultura do milho e do capim-marandu não apresentaram interação. Conclui-se que a aplicação de doses isoladas do AS não promoveu melhorias significativas nos indicadores físicos, químicos e biológicos do solo. As doses de AS não foram suficientes para incrementar o desenvolvimento e a produtividade de grãos de milho e a biomassa do capim-marandu de forma semelhante à utilização de I. A qualidade do solo não foi alterada pelos tratamentos. Destaca-se que o AS não deve ser usado em substituição aos fertilizantes minerais e materiais corretivos e condicionadores do solo. Porém, ressalta-se a necessidade de estudos a campo e de longa duração, para avaliar as melhores práticas de manejo do uso de AS como remineralizador do solo.

Palavras-chave: Agrominerais, Fertilizantes, Saúde do solo, *Urochloa brizantha*, *Zea mays* L.

SOIL QUALITY IN AN AGROPASTORAL SYSTEM WITH APPLICATION OF SILICATIC AGROMINERAL

ABSTRACT - Research on the use of silicate agromineral (SA) as a soil remineralizer in agropastoral production systems is still in its early stages. The objective of this study was to evaluate the application of SA, either associated with or without the use of inputs (I), while monitoring soil quality in an agropastoral system, and to assess the development, production components, maize productivity, and biomass productivity of palisade (*Urochloa brizantha* syn. *Brachiaria brizantha* 'Marandu'). For this purpose, a two-year experiment was conducted under field conditions. The experimental design used was randomized complete blocks with four replications and a 3 x 2 factorial scheme, including three doses of SA (0, 5000, and 10000 kg ha⁻¹) and two application methods (with and without I). The treatments with input application were T1 – conventional mineral fertilization, liming, and gypsum (MF+L+G); T2 – MF+L+G+5000 kg ha⁻¹ of SA; T3 – MF+L+G+10000 kg ha⁻¹ of SA. The treatments without inputs were T4 – 0 kg ha⁻¹ of SA; T5 – 5000 kg ha⁻¹ of SA; and T6 – 10000 kg ha⁻¹ of SA. Soil physical indicators MA, MI, and DS were evaluated in the 0–0.1 m and 0.1–0.2 m layers. Soil chemical indicators pH, OM, CEC, H+Al, SB, BS, Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, and Zn were evaluated in the 0–0.05; 0.05–0.1; 0.1–0.2; and 0.2–0.4 m layers. Biological indicators (arylsulfatase and β -glucosidase enzymes) and IQSFertbio (BioAS) were evaluated in the 0–0.1 m layer. Crop assessments included nutritional status, production components, maize grain productivity, and the production and accumulation of nutrients in the dry phytomass of marandu grass. For the soil's physical indicators, there was interaction between SA doses and inputs for TP and DS in the 0.1–0.2 m layer in 2022, where treatments with I had higher TP values and lower DS values. For the chemical indicators, there was interaction between SA doses and inputs in the 0.0–0.05 m layer for MO, SB, CTC, and S in 2021, and for Al, SB, S, and Cu in 2022. In the 0.05–0.1 m layer, there was interaction for CTC in 2021 and SB, V, and Zn in 2022. In the 0.1–0.2 m layer, only SB in 2022 showed interaction. Overall, inputs led to higher values for physical and chemical indicators, with T3 having the highest levels of Ca, Mg, S, and Zn. Enzymatic soil activity didn't show interaction in both evaluated years, and the soil quality index (BioAS) remained in the high class for all evaluated treatments. Evaluations of the maize and marandu grass crops didn't show interaction. In conclusion, the application of isolated SA doses didn't significantly improve the physical, chemical, and biological indicators of the soil. The SA doses weren't sufficient to enhance maize development and productivity or marandu grass biomass similarly to the use of inputs. Soil quality wasn't affected by the treatments. It's important to note that SA shouldn't replace mineral fertilizers and soil corrective and conditioning materials. However, the need for long-term field studies to assess the best management practices for using SA as soil remineralizers is emphasized.

Keywords: Agrominerals, Fertilizers, Soil Health, *Urochloa brizantha*, *Zea mays* L.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura de alta produtividade depende fortemente de fertilizantes minerais e insumos agrícolas para manter a fertilidade do solo e melhorar as condições químicas e biológicas para o crescimento das plantas. Isso leva a um aumento de produção agrícola e ganhos econômicos satisfatórios (Bamberg et al., 2023). No entanto, é crucial utilizar esses fertilizantes de maneira adequada para aumentar a produtividade das lavouras. O Brasil apresenta alta dependência de importações, que são responsáveis por mais de 70% dos insumos utilizados na produção agrícola do país (Ogino, 2021). Essa dependência coloca a cadeia produtiva e consumidora, respectivamente, em condição de vulnerabilidade e insegurança alimentar.

A insegurança alimentar afetou 61,3 milhões de brasileiros entre 2019 e 2021, com 15.4 milhões em situação grave. A FAO prevê que em 2030, 8% da população mundial, o equivalente a 670 milhões de pessoas, poderão enfrentar fome e insegurança alimentar (FAO, 2021). A atual conjuntura mundial, com a pandemia de COVID-19 e a guerra entre Rússia e Ucrânia, levou a uma das maiores crises alimentares desde a Segunda Guerra Mundial, com cerca de 1.7 bilhão de pessoas enfrentando pobreza extrema e fome em níveis sem precedentes, como alertado pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2022).

Para promover uma agricultura tropical mais sustentável e garantir a segurança alimentar e econômica de países que dependem fortemente da importação de insumos agrícolas, há um potencial promissor na substituição e/ou complementação do uso de fertilizantes inorgânicos altamente solúveis por fontes alternativas (Lin et al., 2023).

Fontes alternativas de nutrientes, como subprodutos da mineração (Santos et al., 2017), pó de rocha (Ramos et al., 2021; Rodrigues et al., 2022) e remineralizadores (Martins et al., 2014), foram discutidos no Plano Nacional de Fertilizantes (Brasil, 2022). O agromineral silicático (AS) tem sido estudado como fonte alternativa, porém, ainda não é amplamente utilizado na agricultura (Ramos et al., 2021; Rodrigues et al., 2022). São necessárias mais pesquisas para avaliar a viabilidade agrícola e econômica desse material, antes de recomendá-lo como fonte de nutrientes.

A correção de solos com rocha moída é uma prática antiga e seu uso é comum na agricultura, como rochas carbonáticas (calcário) para calagem e rochas sulfatadas (gesso) para redução da toxidez por alumínio. Diversos estudos já evidenciaram a capacidade do calcário (correção da acidez do solo e fonte de Ca e Mg) e do gesso agrícola (condicionador do solo e fonte de Ca e S) no aumento de produtividade de espécies agrícolas (Borges et al., 2022a; 2022b). Além dos benefícios já mencionados, o gesso agrícola se destaca por contribuir para redução da saturação por alumínio (Caires, 2012).

No Brasil, existem mais de 100 milhões de hectares de pastagens degradadas (Santos et al., 2022), além de 68 milhões de hectares de solos agricultáveis caracterizados como ácidos e com baixa fertilidade (CONAB, 2021). Assim, a recuperação dessas terras representa uma estratégia para o setor agropecuário. Por outro lado, caracterizado como um sistema que integra os componentes lavoura e pecuária em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área, em um mesmo ano agrícola ou em múltiplos anos (Skorupa, 2019), o sistema agropastoril encontra-se em expansão. Vários estudos já evidenciaram os benefícios dos sistemas agropastoris na melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (Costa et al., 2015; Pires et al., 2020; Sarto et al., 2020, Borges et al., 2021).

A qualidade do solo (QS) é definida como a capacidade do solo em funcionar dentro dos limites do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade do meio ambiente e promover a saúde vegetal e animal (Karlen et al., 1997; Bermeo et al., 2022). Todavia, a QS não pode ser avaliada diretamente, mas é obtida a partir de medições dos atributos físicos, químicos e biológicas do solo (Bünemann et al., 2018). Novas metodologias estão sendo propostas para avaliar a QS em áreas agrícolas no Brasil, recentemente foi criado a BioAs, que é uma metodologia desenvolvida para monitorar os aspectos biológicos do solo (atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase), associado a alguns indicadores físicos e químicos do solo, gerando índices de QS (Mendes et al., 2019).

Com base no exposto, o presente estudo teve como hipóteses: *i*) o uso do AS promove melhorias na qualidade física, química e biológica do solo, *ii*) a aplicação de doses de AS promove incremento na produtividade de grãos de milho e biomassa de capim-marandu pela associação de condicionadores, corretivos e adubação mineral

e *iii*) o AS reduz a quantidade de fertilizantes minerais aplicados. Para tal, avaliou-se a aplicação do uso de um AS, associado ou não à aplicação de calcário, gesso e fertilizantes minerais solúveis, monitorando a qualidade de um solo manejado sob sistema agropastoril, além de avaliar suas implicações no estado nutricional, no desenvolvimento e na produtividade do milho e a produtividade de biomassa do capim-marandu.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema agropastoril

O sistema agropastoril (SAP) integra os componentes lavoura e pecuária em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área, em um mesmo ano agrícola ou em múltiplos anos e são opções interessantes que abordam questões globais como segurança alimentar, mudanças climáticas e agricultura sustentável além de melhorar as condições sociais no meio rural (Borges et al., 2019).

Nos sistemas agropastoris, a produção de grãos e a pecuária acontecem simultaneamente. Esses sistemas normalmente combinam cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e milho (*Zea mays* L.) com produção de gado de corte e leite no mesmo local e têm sido adotados em diversos biomas no Brasil (Santos et al., 2011).

O SAP se encontra em expansão e isto se deve à necessidade do manejo das áreas agrícolas com palha para proteção do solo, por meio do estabelecimento do sistema plantio direto (SPD) ou de pastagem solteira para suportar o gado durante a safra. Este sistema consiste nas combinações: soja e milho + forrageiras em plantio direto no início das chuvas, seguido de milho + forrageiras (quando possível), e pela terminação e engorda de bovinos a pasto na entressafra, o chamado “Boi safrinha” (Skorupa, 2019).

As exportações têm aumentado nas últimas décadas e o inverso tem acontecido com as importações. Este fato se deve aos investimentos em processos de intensificação das lavouras terem se tornado cada vez maiores, no qual a adoção de meios alternativos tem possibilitado o aumento da produtividade, de forma sustentável e econômica (Vieira Filho e Gasques, 2016). O Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro alcançou quase 10 trilhões de reais em 2022, com expansão recorde de 2,9%, na comparação com 2021 (IBGE, 2023).

As espécies vegetais que ocupam a maioria das áreas produtivas no Brasil são a soja, o milho e o arroz (*Oryza sativa* L.) (CONAB, 2021). As espécies do gênero *Urochloa* também têm se destacado na agricultura e na pecuária, principalmente, em solos que apresentam limitações quanto à fertilidade química natural, acidez e topografia (Balbino et al., 2011).

Em áreas agrícolas onde há a exploração de lavoura ou pecuária de forma isolada a qualidade do solo tem sido alterada e os reflexos negativos causados geram instabilidade e redução da sustentabilidade produtiva e financeira, em sua maioria devido ao uso intenso, e extrativo (Vivela et al., 2011). Positivamente, a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura (Plano ABC) tem incentivado o uso de tecnologias e manejos mais sustentáveis, como: recuperação de pastagens degradadas, SAP e SPD (EMBRAPA, 2020).

A preocupação com os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de alimentos, sobre a dinâmica dos ecossistemas e biomas e sobre as populações, especialmente as mais pobres, tornará cada vez maior a atenção ao uso pouco eficiente dos recursos naturais (solo, água, atmosfera, biodiversidade, fontes energéticas) (ANDÁ, 2021). Neste sentido, deve-se levar em consideração o uso do solo, no qual esse recurso deve ser utilizado de forma consciente, sem esgotar suas reservas mineralógicas, a fim de garantir a reposição dos nutrientes de forma sustentável e econômica (Evangelista, 2023).

Vários pesquisadores já relataram os benefícios do SAP sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como: estabilidade de agregados, macro e micro porosidade, teores de Ca, Mg, matéria orgânica, pH, capacidade de trocas catiônicas, soma de bases (SB), maior atividade de organismos da macro e microfauna edáfica do solo, entre outros (Costa et al., 2015; Pires et al., 2020; Sarto et al., 2020b). Nesse sentido, imagina-se que o uso de remineralizadores ou agrominerais silicáticos em SAP, possa contribuir para uma maior sustentabilidade desse sistema, aumentando, também, os ganhos econômicos.

2.2 Corretivos, condicionadores e remineralizadores de solos

Sabe-se que aproximadamente 68 milhões de hectares dos solos brasileiros são ácidos e apresentam baixa fertilidade (CONAB, 2021). Para reduzir a acidez do solo e aumentar a disponibilidade de Ca e Mg nesses solos utiliza-se como principal corretivo o calcário agrícola, capaz de melhorar as condições do solo abaixo das camadas superficiais, sendo considerado um fator de aumento e/ou estabilidade da produtividade das culturas, especialmente, quando há ocorrência de veranicos, comuns em regiões com inverno seco, e em solos que apresentam deficiência de Ca

na sub superfície, associada ou não à toxidez de Al (Costa, 2015; Carvalho et al., 2020).

O gesso agrícola tem sido utilizado como produto complementar ao calcário, e se destaca como condicionador do solo, por proporcionar melhorias nas camadas sub superficiais em SPD e por reduzir os teores de Alumínio (Al) trocável, aumentar os teores de Ca e enxofre (S) e, em alguns casos, pode elevar de forma indireta os valores de pH em camadas sub superficiais do solo (Caires et al., 2011).

Os custos dos fertilizantes utilizados no Brasil para se atingir níveis de fertilidade do solo e reposição dos nutrientes exportados pelas plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), estão cada vez maiores. Este fato está relacionado à necessidade de importação desses insumos, o que coloca a cadeia produtiva do país em uma condição de dependência e vulnerabilidade (Hellegers, 2022). Com isso, a rochagem tem sido apontada como principal tecnologia alternativa para remineralização de solos pobres em nutrientes pelo potencial corretivo, fertilizador e condicionador de solo e características de adição lenta e gradativa de Ca, Mg, K, Sódio (Na), P, Silício (Si) e outros nutrientes na solução do solo, possibilitando a formação de argilominerais de grade 2:1, otimizando a estrutura do solo, equilibrando o pH e proporcionando reversão gradativa do processo de degradação do solo (Martins et al., 2014; Dettmer et al., 2020).

As rochas silicáticas são encontradas e bem distribuídas no território brasileiro, normalmente muito abundantes, inclusive nos resíduos da mineração produzidos pela cominuição de diversos minérios, como na indústria de produção de brita e derivados, carvão, calcário, rochas ornamentais, metais, gemas, entre outros (Martins et al., 2008). O uso dessas rochas é influenciado pela granulometria do material, podendo ser favorecido quando aplicadas em solos onde se utilizam as boas práticas culturais, com boas quantidades de matéria orgânica e alta atividade biológica (Almeida, 2016). Outros formadores de rochas como o silicato de Ca (wollastonita), feldspatóides (nefelina, leucita, kalsilita) e zeolitas também apresentam facilidade ao intemperismo (Luz et al., 2010; Martins et al., 2014).

O pó de basalto, provindo de rochas básicas de origem vulcânica, quando aplicado via solo enriquece os compostos constituídos de resíduos orgânicos e

colabora para a mineralização de solos degradados (Theodoro et al., 2012). Por ter uma certa resistência ao intemperismo, a liberação de nutrientes é gradual.

Os argilominerais presentes em sua composição, podem contribuir para o aumento da CTC, adição de coloides com carga negativa líquida, devido à maior presença de sílica, o que favorece a retenção de cátions, como por exemplo, Ca, Mg e K, além de diminuir o processo de lixiviação (Dettmer et al., 2020).

A desvantagem atribuída ao pó de basalto é a ausência do fornecimento de N, o qual deve ser complementado com fontes orgânicas ou minerais, exceto em culturas que realizam a fixação biológica de N₂ (FBN) (Silveira, 2016). A recuperação dos processos de degradação do solo, a utilização de remineralizadores, associados ao calcário e ao gesso, além de reduzir o uso de adubos minerais, talvez possa contribuir para melhorar a qualidade dos solos (Dettmer et al., 2020).

2.3 Qualidade do solo

A avaliação da qualidade do solo (QS) agrícola pode ser considerada sob os aspectos: físicos, químicos, biológicos e visuais (Giarola et al., 2009; Niero et al., 2010; Pires et al., 2020). Entende-se que a importância destes aspectos na avaliação da degradação ou melhoria dos atributos do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e a duração das mudanças causadas por diferentes sistemas de manejo (Ozório et al., 2019).

As alterações da QS submetido à rotação de culturas podem facilitar a identificação de atributos capazes de influenciar na produtividade e sanidade das plantas, bem como a geração de índices de qualidades do solo, caracterizados pela relação entre a estabilidade estrutural e o acúmulo de estruturas biogênicas (Sarto, et al., 2020b).

Entre as propriedades físicas do solo, a estrutura e a agregação estão entre os parâmetros mais sensíveis quanto ao seu manejo uma vez que a rotação de culturas proporciona melhorias nas condições físicas do solo, reduz a resistência à penetração das raízes e proporciona aumento na macroporosidade e estabilidade de agregados (Sarto et al., 2020a). Nesse sentido, os atributos utilizados como indicadores de qualidade física do solo devem ser aqueles que consideram a profundidade efetiva de enraizamento, porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, distribuição do

tamanho das partículas, densidade do solo, resistência do solo à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados (Serrano Junior, 2021).

Os indicadores de qualidade químicos são, normalmente, agrupados em variáveis relacionadas com o teor de matéria orgânica do solo, a acidez do solo, o conteúdo de nutrientes, elementos fitotóxicos (Al^{3+} , por exemplo) e determinadas relações como a saturação de bases (V) e de alumínio (m) (Asada et al., 2018). A qualidade física do solo contribui indiretamente para a melhoria das condições químicas e biológicas do solo. Contudo, para monitorar estas alterações e a sustentabilidade dos ecossistemas, tem se destacado o método de avaliação visual da estrutura do solo, principalmente, pela rapidez na execução e baixo custo operacional.

A comunidade da macrofauna edáfica é um parâmetro sensível ao impacto de diferentes tipos de sistemas de produção, o que possibilita o seu uso como instrumento na determinação de opções de manejo sustentável dos sistemas agropecuários (Silva et al., 2006; Signor, 2016). A criação de galerias, ninhos, câmaras, pelos “engenheiros do ecossistema” (cupins, besouros escarabeídeos, formigas, milipéias e a minhocas) modificam as propriedades físicas dos solos, bem como a disponibilidade de recursos para outros organismos e estimulam a dinâmica da matéria orgânica do solo, como o sistema agropastoril e plantio direto (Toyota et al., 2006; Signor, 2016).

Os atributos microbiológicos e seus serviços ecossistêmicos são proporcionais ao tempo de implementação do sistema de produção e o potencial das características químicas e biológicas em infligir sobre a qualidade física do solo são observados por meio das análises de atividades de enzimas para o cálculo do índice de qualidade do solo (IQS) (Mendes et al., 2021). A diversidade e atividade microbiana do solo em pastagens tropicais estão relacionadas ao conteúdo de carbono orgânico, N, (P) e outros nutrientes no solo (Pires et al., 2020; Sarto et al., 2020). As enzimas podem servir como bioindicadores da QS. Pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), desenvolveram estudos para a interpretação dos resultados de atividade de enzimas em alguns solos brasileiros, especialmente, da região do Cerrado, tornando possível estender a interpretação dos resultados para

amostras secas ao ar. A atividade enzimática é um indicador importante do componente biológico da fertilidade do solo. Essas determinações podem ser feitas em laboratórios de análise de solo de rotina (BioAS – Tecnologia de Bioanálise de Solo, lançado em 2020) englobando as determinações das atividades das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, as quais estão associadas aos ciclos de S e do C no solo, respectivamente (EMBRAPA, 2020).

A diversidade de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares disponíveis no Brasil, torna-se um viés alternativo para a melhora da qualidade do solo e independência agrícola perante a importação de insumos pelo potencial corretivo, condicionador e fertilizante dos solos destes agrominerais (Castro et al., 2006; Melamed et al., 2009).

Estas fontes de nutrientes provenientes de diferentes formações geológicas, muitos dos quais ainda desconhecidos, em adição aos produtos e coprodutos de processos biológicos presentes na natureza, cujos organismos (fungos, bactérias, actinomicetos e micorrizas) são capazes de promover crescimento das plantas, controlar pragas, ampliar a eficiência de absorção de nutrientes, promovem a fixação biológica de nitrogênio, podendo promover melhorias na qualidade do solo (Serrano Junior, 2021).

Neste contexto, o aproveitamento de rochas silicáticas na forma de pó de rocha como fertilizante, corretivo e/ou condicionador do solo, apresenta-se como um grande potencial de uso, especialmente, em sistemas de produção agropecuário.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do local, caracterização do solo e culturas

O experimento foi desenvolvido em condições de campo, no Centro Avançado de Pesquisa e Desenvolvimento de Seringueira e Sistemas Agroflorestais, do Instituto Agrônomo (IAC), da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – (APTA), da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAA/SP), localizado no município de Votuporanga, SP, apresentado as coordenadas geográficas de 20°28'27" S e 50°03'59" O, com altitude de 467 m (Figura 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, textura arenosa (Santos et al., 2018).

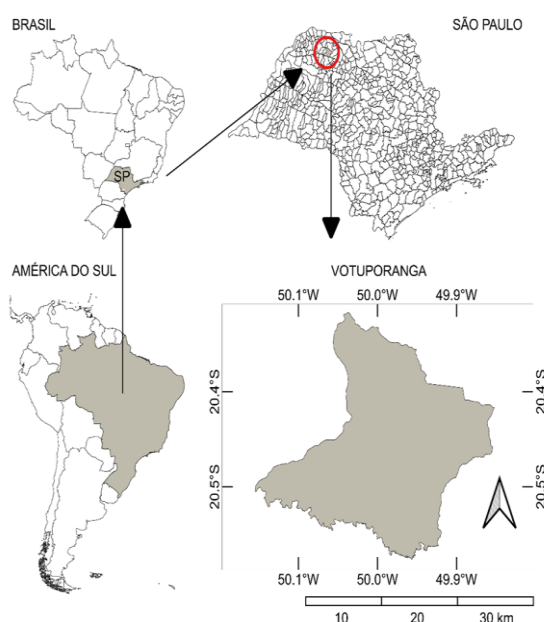


Figura 1. Mapa de localização da área experimental localizada em Votuporanga, SP.

O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (Lombardi Neto; Drugowich, 1994), com temperatura média anual de 24°C, umidade relativa do ar de 75% e precipitação pluvial média anual é de 1449,11 mm.

Durante toda a realização do experimento foram monitorados os dados diários referentes às temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação pluvial (Figura 2).

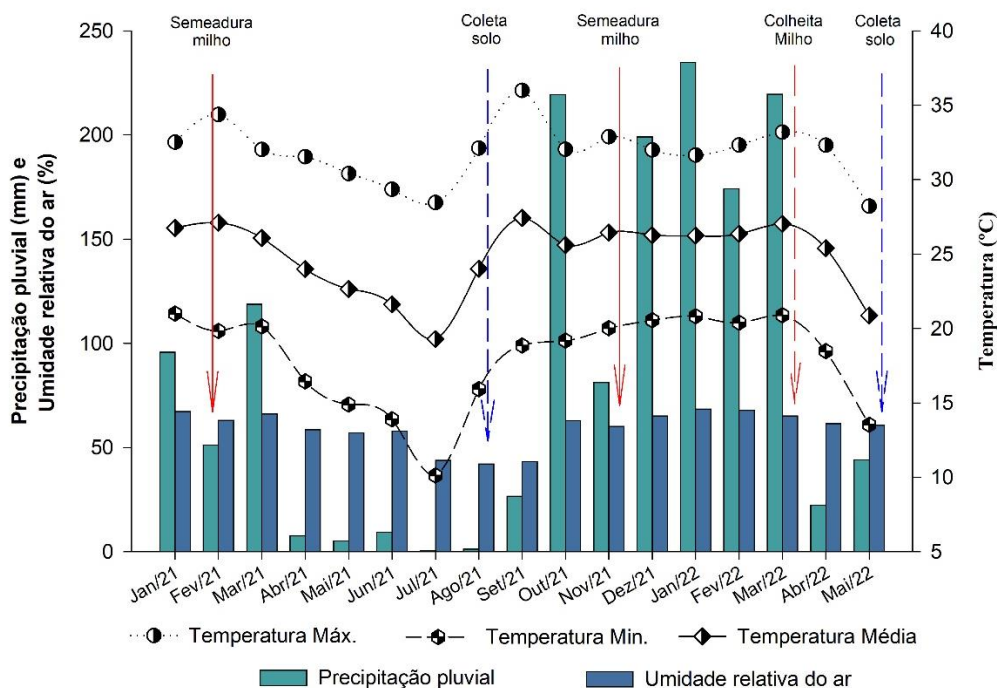


Figura 2. Precipitação pluvial, umidade relativa do ar, temperaturas média, máxima e mínima obtidas durante o cultivo das culturas de milho e capim-marandu nos anos de 2021 e 2022. Os dados foram coletados na estação meteorológica da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios do Centro Avançado de Pesquisa e Desenvolvimento de Seringueira e Sistemas Agroflorestais.

3.2 Histórico da área experimental

O experimento foi instalado no ano agrícola 2010/11, em uma área de aproximadamente um hectare, que era destinada à produção de grãos com sistema convencional de preparo do solo. Desde então, todos os cultivos foram realizados em sistema agropastoril, sendo utilizado a rotação soja + *Crotalaria juncea* (pós soja) e milho em consórcio com capim-marandu (após *C. juncea*). Neste sistema, bovinos de corte recém-desmamados são introduzidos 60 dias após a colheita do milho e permanecem na área por 14 meses. Em seguida, veda-se a área por 30 dias, e, na sequência, é realizada a semeadura da soja sobre a palhada do capim-marandu. O

sistema de pastejo utilizado é contínuo e a taxa de lotação varia conforme a oferta de forragem.

3.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Os tratamentos foram arranjos em esquema fatorial 3 x 2, sendo três doses de AS (0; 5000 e 10000 kg ha⁻¹) e com ou sem aplicação de insumos (calcário – C, gesso – G e adubação mineral – AM). Os tratamentos com aplicação de insumos foram T1 – adubação mineral (AM), calagem (C) e gessagem (G); T2 – AM+C+G+ 5000 kg ha⁻¹ de AS; T3 – AM+C+G+ 10000 kg ha⁻¹ de AS; T4 – 0 kg ha⁻¹ de AS; T5 – 5000 kg ha⁻¹ de AS; e, T6 – 10000 kg ha⁻¹ de AS. As doses e as aplicações de calcário, gesso agrícola e fertilizantes minerais foram realizadas conforme recomendações descritas em Rajj et al. (1997).

3.4 Caracterização do agromineral silicático

O agromineral silicático foi obtido junto à Mineração Grandes Lagos LTDA, oriundos de pedreira do município de Riolândia-SP. A caracterização geoquímica (elementos maiores) e mineralógica foi realizada em um laboratório cadastrado junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA coletando-se uma amostra de 500 g do AS para avaliação das características químicas, mineralógicas e físicas do material, com objetivo de avaliar se esse material estava condizente com a Instrução Normativa (IN) 5 de 10 de março de 2016, cumprindo os critérios mínimos definidos pelo MAPA para ser classificado como remineralizador de solo (Brasil, 2016).

A composição química total dos elementos maiores na forma de óxidos da amostra estudada (Tabela 1) evidencia a composição química do AS. A soma de bases (CaO + MgO + K₂O) do material é de 16,59% e o teor de K₂O de 1,03%. A soma de bases é superior a 9% e o óxido de potássio superior a 1%, conforme o exigido pela (IN) 5 (Brasil, 2016).

Tabela 1. Caracterização química⁽¹⁾ dos elementos maiores do agromineral silicático.

Elementos maiores	Valores obtidos (%)
SiO ₂	50,55
Al ₂ O ₃	12,74
Fe ₂ O ₃	14,5
CaO	10,04
MgO	5,52
Na ₂ O	2,53
K ₂ O	1,03
MnO	0,21
P ₂ O ₅	0,28
TiO ₂	2,03
PF ⁽²⁾	1,28
Total	100,71

⁽¹⁾ Fluorescência de Raios-X. ⁽²⁾ Perda ao fogo (voláteis estruturais).

Os elementos potencialmente tóxicos estavam em níveis inferiores a 1,0 mg kg⁻¹ para os elementos As, Cd e Pb e inferior a 0,1 mg kg⁻¹ para o Hg (Tabela 2), considerados abaixo dos limites máximos permitidos pela IN 5/2016 do MAPA (As = <0,1 mg kg⁻¹; Cd = <10 mg kg⁻¹; Pb = <200 mg kg⁻¹; Hg = <0,1 mg kg⁻¹) para ser considerado remineralizador de solos.

O pH de abrasão é de 7,8, evidenciando que o AS é alcalino. A mineralogia do AS indica uma composição típica de basaltos (Tabela 3). Os minerais reativos perfazem 94,77%. Os mais reativos são o piroxênio augita (30,46%), os plagioclásios labradorita (21,38%) e andesina (17,53%), o material de baixa cristalinidade (15,60%), o argilomineral 2:1 celadonita (0,68%) e a apatita (0,19%).

Tabela 2. Caracterização química dos elementos potencialmente tóxicos⁽¹⁾ da amostra de agromineral silicático.

Elemento	Valores obtidos (mg kg ⁻¹)
Arsênio (As)	< 1,0
Cádmio (Cd)	< 1,0
Chumbo (Pb)	< 1,0
Mercúrio (Hg)	< 0,1

⁽¹⁾ Instrução Normativa Nº 5/2016.

O ortoclásio (4,54%) é um mineral de baixa reatividade, mas que pode fornecer K, da mesma forma que a clorita (4,39%), que pode fornecer Si e Mg em médio e

longo prazo. Os minerais considerados quimicamente inertes são os óxidos hematita, magnetita, ilmenita, ulvoespinelio e o quartzo, perfazendo 5,24%. Os óxidos de titânio (teor total 2,03%, Tabela 1), como a ilmenita e o ulvoespinelio, podem ser minerais importantes na adsorção de compostos de N no solo (Barrón et al., 2020). O teor de sílica livre (quartzo), perfaz somente 2,32% (Tabela 3) do AS, ou seja, muito abaixo do limite máximo de 25% determinado pela IN 5 do MAPA (Brasil, 2016).

Por meio do ensaio granulométrico, pôde-se notar que 100% em massa da amostra é passante nas peneiras de abertura 2,00 mm, 78,49% em massa da amostra é passante na peneira de abertura 0,840 mm, 56,35% passante na peneira com abertura 0,425 mm e 49,62% passante na peneira com abertura 0,300 mm (Tabela 4). Dessa forma, o AS é classificado como de natureza pó, de acordo com o MAPA (Brasil, 2016).

Tabela 3. Caracterização mineralógica⁽¹⁾ do agromineral silicático.

Mineral	Valores obtidos (%)
Augita	30,46
Labradorita	21,38
Andesina	17,53
Ortoclásio	4,54
Clorita	4,39
Celadonita	0,68
Material de baixa cristalinidade	15,6
Apatita	0,19
Hematita	1,35
Magnetita	0,91
Ilmenita	0,38
Ulvoespinelio	0,28
Quartzo	2,32
Total	100,01

⁽¹⁾ Método de Rietveld.

Tabela 4. Caracterização granulométrica⁽¹⁾ da amostra de agromineral silicático.

Peneira (abertura, mm)	% em massa passante
2,0	100,0 ± 1,0
0,84	78,49 ± 0,86
0,425	56,35 ± 0,62
0,3	49,62 ± 0,55

⁽¹⁾ Instrução Normativa Nº 5/2016.

3.5 Instalação e desenvolvimento do experimento

Na safra 2020/21, antes da aplicação dos tratamentos, foram realizadas amostragens do solo nas camadas de 0–0,2 e 0,2–0,4 m de profundidade para caracterização física (Tabela 5) (Teixeira et al., 2017) e química do solo (Tabela 6) (Raij et al., 2001). Em função dos resultados obtidos na análise química, foi realizada a calagem utilizando calcário agrícola com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 85%, objetivando elevar a saturação por bases a 70% e gessagem considerando o teor de argila de 96 g kg⁻¹ (Raij et al., 1997). A aplicação foi realizada apenas nos tratamentos T1, T2 e T3. Cada unidade experimental (parcela) foi constituída por 5 m de largura e 5 m de comprimento totalizando 25 m² por parcela e 600 m² de área total. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas linhas centrais das culturas, eliminando-se (um metro) de cada extremidade.

Tabela 5. Caracterização dos atributos físicos⁽¹⁾ do solo da área experimental no ano de 2020.

Profundidade	MA	MI	PT	DS	Areia	Silte	Argila
m	m m ⁻³			g cm ⁻³	g kg ⁻¹		
0,0–0,2	0,3	0,3	0,4	1,64	863,0	65,0	72,0
0,2–0,4	0,3	0,31	0,3	1,79	831,0	73,0	96,0

⁽¹⁾ Teixeira et al. (2017). MA – Macroporosidade. MI – Microporosidade. PT – Porosidade total. DS – Densidade do solo.

Tabela 6. Caracterização dos atributos químicos⁽¹⁾ da área experimental no ano de 2020.

Profundidade	P	S	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	V
m	mg dm ⁻³		g dm ⁻³			mmolc dm ⁻³				%
0,0–0,2	21,0	2,5	15,0	4,3	2,6	9,6	6,5	30,0	2,7	39,0
0,2–0,4	20,9	2,5	13,0	4,1	2,1	8,6	5,2	34,0	6,1	32,0

⁽¹⁾ Raij et al. (2001). P – Fósforo. S – Enxofre. MO – Matéria orgânica do solo. pH – Acidez ativa. H+Al – Acidez potencial. K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, Al – Alumínio. V – Saturação por bases.

Nos tratamentos que receberam 5000 ou 10000 kg ha⁻¹ de AS, as doses de AS foram aplicadas de forma manual, 60 dias antes da semeadura, distribuindo o produto sobre a superfície do solo, sem incorporação (Anexo 1a). Em fevereiro de 2021, foi semeado o híbrido de milho MG545 PWU na segunda safra (Anexo 1b). Antes da semeadura foi realizado o tratamento das sementes com metalaxil-M 0,02 kg L⁻¹, tiabendazol 0,15 kg L⁻¹ e fludioxonil 0,025 kg L⁻¹, na dose de 0,15 L ha⁻¹.

Nos tratamentos que receberam adubação mineral convencional, na adubação de semeadura, foi utilizado o adubo formulado 08–28–16 com 10% de S (S-SO_4) e 0,3% de Zn, na dose de 260 kg ha^{-1} . A primeira adubação de cobertura foi realizada em estágio vegetativo V4 (20 dias após a emergência das plantas – DAE), utilizando-se 250 kg ha^{-1} do adubo formulado 20–00–20. Ainda no estágio vegetativo V4, foi semeado mecanicamente duas linhas de capim-marandu na entrelinha do milho. Utilizou-se $12,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de sementes incrustadas, (60% de sementes puras e 60% de VC). A segunda adubação de cobertura foi realizada em março de 2021 em estágio vegetativo V6 (25 DAE), utilizando-se sulfato de amônio (21% de N e 22% de S), na dose de 250 kg ha^{-1} . O manejo fitossanitário foi realizado conforme as recomendações técnicas para as culturas na região.

O desenvolvimento do milho e do capim-marandu para a segunda safra de 2020/21, foi comprometido devido às condições climáticas desfavoráveis para região (Figura 2), não sendo possível realizar as avaliações das características agronômicas e produtividade de grãos do milho. Também não foi possível realizar as avaliações da produção de biomassa do capim-marandu.

Para a safra 2021/22, foi utilizado novamente o híbrido de milho AG 8088 PRO2, que foi semeado no espaçamento de 0,8 m entrelinhas e com 5,2 sementes por metro. A semeadura foi realizada mecanicamente em sistema de plantio direto no dia 19/11/2021. A semente foi tratada industrialmente com metalaxil-M $0,02 \text{ kg L}^{-1}$, tiabendazol $0,15 \text{ kg L}^{-1}$ e fludioxonil $0,025 \text{ kg L}^{-1}$, na dose de $0,15 \text{ L ha}^{-1}$ e clotianidina 600 g L^{-1} , na dose de $0,35 \text{ L ha}^{-1}$. A adubação de semeadura e de cobertura foram realizadas de forma semelhante à safra anterior, sendo aplicadas as mesmas doses dos fertilizantes minerais.

Assim como na safra de 2020/21, no estágio vegetativo V4 da cultura do milho, foram semeadas mecanicamente duas linhas de capim-marandu na entrelinha do milho. Adotando o mesmo procedimento da safra 2020/21. O manejo fitossanitário das culturas, foram realizados conforme as recomendações técnicas para as culturas na região. Durante a condução e desenvolvimento do experimento não ocorreu irrigação, e para o mesmo período restringiu-se a entrada de bovinos na área.

3.6 Variáveis avaliadas

3.6.1 Solo

As avaliações físicas, químicas e biológicas do solo foram realizadas aos 8 e 16 meses após a aplicação dos tratamentos (AAT).

a) Indicadores físicos do solo

Amostras de solo para análise física (Danielson et al., 1986) foram coletadas em setembro de 2021 e maio de 2022, ou seja, aos 8 e 16 meses após a aplicação dos tratamentos, nas camadas de 0,0–01, 0,1–02, m de profundidade. Para tal, realizou-se a abertura de trincheiras para coleta de amostras de solo com anéis volumétricos de aproximadamente 0,05 m de diâmetro e 0,04 m de altura para análise de macroporosidade (MA), microporosidade (MI), porosidade total (PT) e densidade do solo (DS) (Anexo 1c). Foram coletadas três sub amostras por profundidade dentro da área útil da parcela. Após a coleta das amostras, ainda no campo, retirou-se o excesso de solo dos bordos dos anéis e o bordo inferior do anel foi envolvido com tecido de poliéster e atilho de borracha para evitar perdas de solo. Em laboratório, as amostras foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com altura de água atingindo 3/4 da altura dos anéis. Após 24 h de imersão em água, obteve-se a massa saturada das amostras. Em seguida, por meio de mesa de tensão (Dane e Hopmans, 2002), iniciou-se a drenagem das amostras na tensão de 0,006 MPa, obtendo a massa úmida do solo em equilíbrio nessa tensão, para em seguida serem colocadas para secar a 105° C por 48h em estufa de aeração forçada para obtenção de massa de solo seco. A densidade do solo foi calculada pelo quociente da massa de solo e o volume do anel volumétrico. Considerando que a tensão de drenagem de 0,006 MPa é suficiente para retirar a água alocada nos macroporos, foi possível determinar o volume de microporos de acordo com os procedimentos descritos em Danielson et al. (1986). Com a diferença entre as massas das amostras saturadas com água e secas a 105°C, tendo o volume conhecido das amostras, calculou-se a porosidade total do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo.

b) Indicadores químicos do solo

A amostragem do solo (0–0,05; 0,05–0,1; 0,1–0,2 e 0,2–0,4 m) foi realizada em setembro de 2021 e em maio de 2022. A coleta dessas amostras foi realizada dentro da área útil de cada parcela. Foram coletadas oito sub amostras por parcela, aleatoriamente, para compor uma amostra composta. Essas amostras foram retiradas com o auxílio de uma sonda de amostragem (Anexo 1d), na sequência, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas em câmara seca até o momento das análises.

Foram determinados: matéria orgânica após oxidação com $K_2Cr_2O_7$ em presença de H_2SO_4 e titulação do excesso de dicromato com a solução de $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 0,4 mol L^{-1} , pH em $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1} (relação solo: solução 1:2,5), a acidez potencial (H+Al) estimada pelo método do pH SMP e os teores de P, K, Ca e Mg no solo extraídos pela resina trocadora de íons (Raij et al., 2001); com esses resultados foram calculados os valores de saturação por bases (V) mediante a relação entre o teor de bases trocáveis no solo (Ca, Mg e K) e a capacidade de troca de cátions (CTC), em $mmol_c\ dm^{-3}$ (Anexo 1e,1f). Também foram analisados os micronutrientes: B (extração em água quente e quantificação em espectrofotômetro UV-VIS a 420 nm); Cu, Fe, Mn e Zn (extração por DTPA em pH 7,3 e determinação por espectrofotometria de absorção atômica), conforme metodologia preconizada por Raij et al. (2001).

c) Indicadores biológicos do solo

A amostragem do solo (0–0,1 m) foi realizada dentro da área útil de cada parcela, no mesmo momento em que foram coletadas as amostras de terra para a obtenção dos indicadores químicos do solo (Anexo 1d). Foram coletadas cinco subamostras por parcela, aleatoriamente, para compor uma amostra composta. O preparo das amostras de terra seguiu o mesmo protocolo recomendado para as análises químicas do solo (item b).

Para a determinação das atividades das enzimas β -glucosidade e arilsulfatase do solo, foram utilizados os métodos descritos por Tabatabai (1994). A avaliação foi realizada por determinação colorimétrica do composto p-nitrofenol que é formado após a adição dos substratos específicos para cada enzima. Em relação a β -

glucosidade, o substrato utilizado foi o p-nitrofenil- β -D-Glucopyranosídeo (PNG) e para a arilsulfatase o p-nitrofenil sulfato (PNS).

d) Índice de qualidade biológico

Um IQS contendo propriedades químicas (FERT) obtido com base nas informações das tradicionais análises de fertilidade química do solo (pH, H+Al, Ca, K, P, Mg e MOS) e biológicas (BIO) obtidos por meio das enzimas arilsulfatase e β -glucosidase, que estão associadas aos ciclos do (S) e do (C), respectivamente (IQSFertbio) foi calculado com base nos modelos propostos por Mendes et al. (2021). O IQSFertbio atribui três funções ao solo: (F1) a capacidade do solo de ciclar nutrientes; (F2) a capacidade do solo em armazenar nutrientes e (F3) a capacidade do solo em fornecer nutrientes. O IQSFertbio permite diferenciar, por exemplo, áreas com IQSFert alto/muito alto, mas que não necessariamente possuem IQSBio satisfatórios, condição que dificilmente seria identificada apenas com as análises de fertilidade do solo (Mendes et al., 2018; 2021).

3.6.2 Planta

a) Milho 2021/22

Para avaliar o estado nutricional da cultura, quando as plantas atingiram o pleno florescimento, foram coletadas em 10 plantas, o terço médio da folha da base da espiga (folha diagnose) dentro da parcela útil (Raij, 2011). Depois de lavadas, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, trituradas em moinho tipo Willey e armazenadas até o momento das análises. Nas amostras das folhas diagnose foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

Quando a maioria das plantas apresentaram espigas com grãos pastosos (R4), foram avaliados: altura das plantas, altura da primeira espiga e o diâmetro do colmo de vinte plantas consecutivas, na área útil de cada parcela, que foram expressas em centímetros (Portugal, 2015). A altura da planta foi obtida medindo-se, com auxílio de uma régua graduada, a distância entre o colo da planta e a inserção da última folha. Para a altura da espiga, também com auxílio de uma régua graduada, foi medida a distância entre o colo da planta e a inserção da espiga principal. Para a obtenção do

diâmetro do colmo, foi realizada uma medida no primeiro entrenó acima do solo, com o auxílio de um paquímetro digital, no sentido de disposição das folhas.

No estádio R6, foram coletadas aleatoriamente, de forma manual, dez espigas dentro da área útil da parcela, para a determinação do número de grãos por espiga e do teor de micronutrientes nos grãos. O número de grãos por espiga foi avaliado por meio da contagem do número de fileiras de grãos e do número de grãos por fileiras, obtendo-se o valor médio. As amostras de grãos de milho foram submetidas à secagem em estufa a 65 °C por 72 h, moídas e posteriormente determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (Malavolta et al., 1997).

A produtividade de grãos foi obtida ao final do ciclo da cultura (março de 2022). Duas linhas de tres metros dentro na área útil de cada parcela (Anexo 1g) foram colhidas e trilhadas manualmente, pesadas e os resultados extrapolados para kg ha⁻¹ e corrigidos para o teor de 13% de umidade (base úmida). A massa de mil grãos foi avaliada por meio de duas amostragens de mil grãos por parcela da produtividade obtida, com posterior pesagem em balança digital e a transformação dos dados para 13% de umidade.

b) Capim-marandu

A produtividade de matéria seca da forragem do capim-marandu foi avaliada em (11/05/2022). Para tanto, retirou-se duas amostras de 0,5 x 0,5 m por parcela (Anexo 1h), as quais foram acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa a 65 °C por 72 h. Após secas, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey com peneira de 40 mesh. Em seguida, foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

3.7 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P < 0,05$), nos casos em que o teste F foi significativo. Também foram realizadas análises de correlação de Pearson. A análise estatística foi realizada por meio do software R (CORE TEAM, 2021) e do software AgroEstat® versão 1.1.0.712 (Barbosa; Maldonado, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Indicadores físicos do solo

Para os indicadores físicos avaliados após o cultivo das culturas de milho e capim-marandu, verificou-se interação entre às doses de AS e insumos apenas para PT e DS no ano de 2021, na camada 0,1–0,2 m (Tabela 7). Desse modo, foi observado que os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram os maiores valores de PT do solo, enquanto os tratamentos T4, T5 e T6 apresentaram maior DS (Figura 3a e 3b).

Quanto ao efeito dos insumos, MA, MI, PT e DS apresentaram variação em ambas as camadas analisadas no ano de 2021 (Tabela 7). Por outro lado, no ano de 2022, a diferença foi observada na MA e MI na camada de 0–0,1 m. Na camada de 0,1–0,2 m, apenas a MA variou em função do efeito dos insumos. Tais resultados sugerem que o uso dos insumos proporcionou efeito significativo nos indicadores físicos do solo durante o ano de 2021. De modo geral, pôde-se notar superioridade nos valores dos indicadores físicos na utilização de insumos quando comparados aos tratamentos com AS. A MA do solo é uma propriedade mais facilmente alterada pelo tipo de manejo adotado e valores abaixo do limite tido como crítico ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), aliados à densidade do solo superior a $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ podem interferir no desenvolvimento radicular da cultura (Seidel et al., 2015).

Geralmente, os atributos físicos do solo variam no espaço e no tempo e dependem dos manejos aplicados às pastagens, com alterações na (DS), resistência do solo à penetração e porosidade (Silva et al., 2017). Com isso, há uma diminuição na infiltração e acúmulo de água (Bonetti et al., 2019). Há também estudos que mostram que as pastagens, quando bem manejadas, melhoram as condições físicas, aumentam a porcentagem de agregados com diâmetros maiores (Soares et al., 2016), aumentam a retenção de água, a taxa de infiltração e a porosidade, além de diminuir a DS (Bonetti et al., 2019).

Tabela 7. Efeitos dos tratamentos na macroporosidade (MA), microporosidade (MI), porosidade total (PT) e densidade do solo (DS), em amostras coletadas nas camadas de 0–0,1 e 0,1–0,2 m após o cultivo da cultura do milho e do capim-marandu.

Tratamentos	MA		MI		PT		DS	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	m³ m⁻³						kg cm⁻³	
	0–0,1 m							
Doses de AS								
0 kg ha⁻¹	0,35 a	0,36 a	0,32 a	0,32 a	0,36 a	0,36 a	1,59 a	1,47 a
5000 kg ha⁻¹	0,46 a	0,36 a	0,37 a	0,33 a	0,34 a	0,37 a	1,55 a	1,47 a
10000 kg ha⁻¹	0,44 a	0,36 a	0,35 a	0,32 a	0,34 a	0,36 a	1,59 a	1,48 a
Insumos								
Com	0,5 a	0,5 a	0,36 a	0,32 b	0,41 a	0,36 a	1,55 b	1,46 a
Sem	0,3 b	0,3 b	0,31 b	0,34 a	0,34 b	0,37 a	1,61 a	1,49 a
Teste F								
Doses (D)	1,83 ^{ns}	0,0 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,39 ^{ns}	1,52 ^{ns}	0,38 ^{ns}	2,55 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Insumos (I)	20,0**	37,45**	8,83**	8,42*	14,49**	0,17 ^{ns}	10,84**	1,46 ^{ns}
(D) x (I)	2,06 ^{ns}	0,07 ^{ns}	1,29 ^{ns}	0,05 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,25 ^{ns}
CV (%)	28,13	24,21	12,24	6,54	12,17	5,93	2,62	4,67
	0,1–0,2 m							
Doses de AS								
0 kg ha⁻¹	0,4 a	0,3 a	0,34 a	0,3 a	0,38 a	0,34 a	1,61 a	1,57 a
5000 kg ha⁻¹	0,5 a	0,3 a	0,32 a	0,29 a	0,37 a	0,32 a	1,61 a	1,56 a
10000 kg ha⁻¹	0,5 a	0,4 a	0,33 a	0,29 a	0,38 a	0,33 a	1,58 a	1,56a
Insumos								
Com	0,5 a	0,4 a	0,35 a	0,29 a	0,41 a	0,33 a	1,56 a	1,56 a
Sem	0,4 b	0,3 b	0,31 b	0,3 a	0,35 b	0,32 a	1,65 b	1,57 a
Teste F								
Doses (D)	2,38 ^{ns}	4,24*	0,46 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,6 ^{ns}	2,55 ^{ns}	0,27 ^{ns}
Insumos (I)	5,07*	92,59**	13,22**	0,36 ^{ns}	24,06**	0,85 ^{ns}	53,66**	0,77 ^{ns}
(D) x (I)	0,49 ^{ns}	3,62 ^{ns}	3,0 ^{ns}	0,32 ^{ns}	4,82*	0,14 ^{ns}	3,85*	0,06 ^{ns}
CV (%)	17,45	12,3	9,55	9,68	7,2	8,46	1,82	2,37

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS.

Com relação à MI, Azevedo e Dalmolin (2006) preconizam níveis de microporosidade acima de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e valores de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como limite inferior de PT, para o solo agrícola ideal. No geral, os valores de MI encontrados estão acima do valor considerado ideal para o desenvolvimento das plantas. Apesar disso, alguns estudos já demonstraram que as práticas de sistemas de preparo do solo, com mobilização mínima do solo, podem melhorar o armazenamento de água ao longo do ciclo da cultura (Haruna; Anderson, 2020). Galdos et al. (2019) ressaltaram que nenhum revolvimento do solo proporciona maior mesoporos no solo, tornando a

porosidade mais eficiente e contribuindo para uma maior retenção de água. Vale ressaltar que existem vários fatores relacionados à capacidade de armazenamento de água no solo e sua disponibilidade para as plantas, entretanto, um dos principais fatores é o sistema de manejo do solo, pois modifica as propriedades físicas do solo associadas à estrutura, como disponibilidade hídrica, aeração e resistência ao crescimento das raízes, diretamente relacionadas ao desenvolvimento das plantas (Silva et al., 2022).

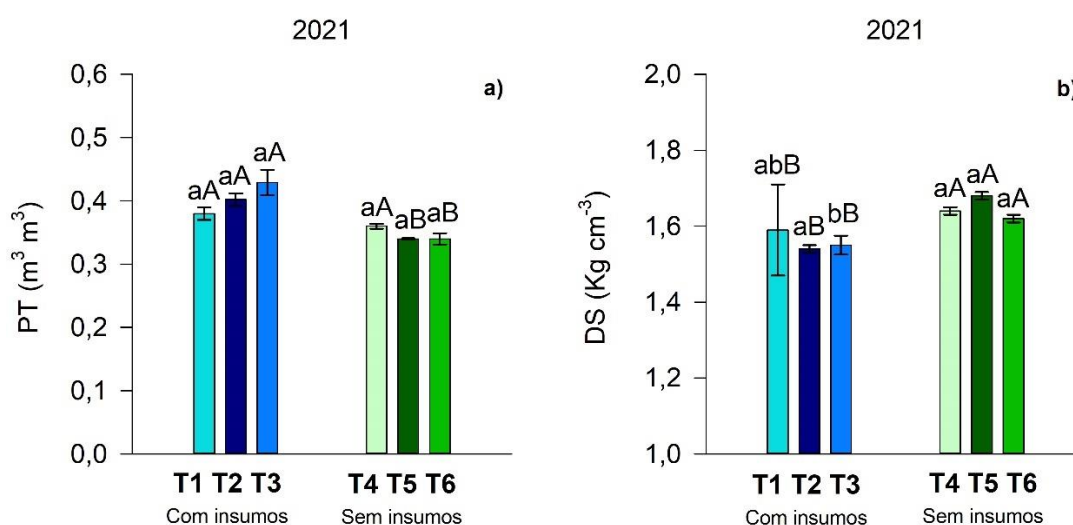


Figura 3. Porosidade total (PT) camada 0,1–0,2 m (a). Densidade do Solo (DS) camada 0,1–0,2 m (b), no ano de 2021, em resposta aos tratamentos avaliados: T1 – adubação mineral (AM), calagem (C) e gessagem (G); T2 – AM+C+G+ 5000 kg ha⁻¹ de AS; T3 – AM+C+G+ 10000 kg ha⁻¹ de AS; T4 – 0 kg ha⁻¹ de AS; T5 – 5000 kg ha⁻¹ de AS; e, T6 – 10000 kg ha⁻¹ de AS. Médias seguidas da mesma letra (minúscula entre tratamentos e maiúscula entre modo de aplicação com e sem insumos) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As alterações observadas neste estudo apontam para a eficácia da adoção do sistema agropastoril, ao qual possibilita melhorias na qualidade física e química do solo, uma vez que, a inclusão de pastagens na rotação de culturas pode aumentar rapidamente a estabilidade dos agregados, a MA e a condutividade hidráulica, muito importante para os solos frágeis como os arenosos. Isso ocorre devido à combinação da ausência do preparo de solo, à presença de um denso sistema radicular que atua como agente agregante, e uma maior atividade da macrofauna do solo na fase de pastagem (Marchão et al., 2007). Além disso, as forrageiras, como é o caso das

Urochloas, conseguem superar períodos com baixo índice pluviométrico, contribuindo para melhorias das condições físicas do solo (Fonseca et al., 2007; Loss et al., 2011).

No geral, observou-se que os valores encontrados estão próximos aos considerados como críticos ($1,40 \text{ kg dm}^{-3}$) para DS (Seidel et al., 2015). Contudo, é importante destacar que muitas vezes esses limites não se tornam limitantes para o crescimento das plantas, principalmente, quando as condições climáticas são adequadas para o desenvolvimento da cultura.

4.2 Indicadores químicos do solo

Para os indicadores químicos do solo na camada de 0,0–0,05 m de profundidade, verificou-se interação entre às doses de AS e insumos para: MO, SB e CTC no ano de 2021, enquanto, para o ano de 2022 notou-se interação para Al e SB (Tabela 8). Na camada de 0,05–0,1 m, houve interação para CTC no ano de 2021 e SB e V no ano de 2022 (Tabela 8). Na camada subsuperficial (0,1–0,2 m) apenas a SB no ano de 2022 apresentou interação (Tabela 9). O conteúdo de MO foi maior nos tratamentos sem aplicação dos insumos, sendo que o tratamento T6 ($22,25 \text{ mg dm}^{-3}$) foi superior ao T4 em 25% (Figura 3a). Observou-se que os tratamentos com insumos proporcionaram redução dos teores do Al em comparação às doses de AS (Figura 3b). Para SB, verificou-se que os maiores valores foram encontrados com a utilização dos insumos (Figuras 3d e 3e), com exceção da camada superficial de 0,0–0,05 m no ano de 2021 (Figura 3c). Notou-se que para a CTC, os insumos promoveram os maiores valores, no qual o tratamento T3 referente a adubação mineral convencional, calagem e gessagem + 10000 kg ha^{-1} de AS foi superior ao T1 e T2 na camada 0,05–0,1 m para o ano de 2021 (Figura 3f e 3g). Em relação ao V, os insumos promoveram os maiores valores em comparação às doses de AS isoladas (Figura 3h).

A baixa resposta da MO em relação aos tratamentos aplicados pode ser explicada pelo aumento da ciclagem de nutrientes promovida pelo sistema agropastoril. Isso se deve à combinação de maior cobertura do solo e pouco ou nenhum revolvimento do solo, característico dos sistemas agropastoris. A rotação ou sucessão de lavoura e pecuária é uma prática que favorece a ciclagem de nutrientes e a manutenção da MO no solo. Isso ocorre porque a produção de culturas e animais em uma mesma área permite o aproveitamento de resíduos de uma atividade para a

outra, garantindo o aporte constante de MO. Borges et al. (2019), avaliando a integração de pastagem e milho em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico na região do Cerrado, atribuiu as melhorias nos atributos MO, SB, CTC e V à incorporação dos resíduos vegetais e animais. Manter o conteúdo de MO é primordial em regiões tropicais, visto que a MO é um componente fundamental para a qualidade dos sistemas de produção, pois seu conteúdo e qualidade influenciam diretamente na fertilidade do solo e na sustentabilidade dos agroecossistemas (Silva et al., 2022).

Para acidez ativa (pH), mesmo não havendo interação, houve diferença entre os insumos utilizados para as camadas superficiais 0,0–0,05 e 0,05–0,1 m no ano de 2021 e 2022, observou-se que os tratamentos com insumos apresentaram maiores valores em comparação às doses de AS (Tabela 8). Além disso, houve aumento no ano de 2022 em comparação a 2021 nas camadas mais superficiais, com aumentos de 15,21 % na camada de 0,0–0,05 m e 4,54% na camada de 0,05–0,1 m (Tabela 8). A acidez do solo é um fator que pode limitar o crescimento das culturas, uma vez que pode resultar na presença de elementos tóxicos e reduzir a disponibilidade de nutrientes para as plantas. No entanto, é possível superar essa limitação por meio da adoção de práticas de manejo conservacionistas, como a calagem, a rotação de culturas e a adubação equilibrada. Ao adotar essas estratégias, é possível melhorar significativamente a qualidade do solo, o que pode levar a um aumento da produtividade das culturas. Por outro lado, verificou-se redução do pH a medida que aumentava a profundidade do solo, isso deve-se ao fato de que os materiais corretivos são pouco solúveis e os produtos da reação do calcário têm mobilidade limitada, principalmente quando aplicados em superfície e sem incorporação no solo tornando a ação desse insumo limitada, conforme apontado por Rosolem et al., (2003).

O efeito da utilização dos insumos sobre H+Al apresentou diferença na camada de 0,0–0,05 m nos dois anos avaliados, e para camada 0,1–0,2 m no ano 2022 (Tabela 8). Para as demais profundidades estudadas não houve diferença para os insumos e doses utilizados. Notou-se um aumento nos valores de H+Al em profundidade, esse fato está relacionado aos níveis de pH descritos anteriormente, uma vez que à medida que o pH diminui em profundidade, ocorre um aumento nos teores de H+Al, já que o pH é o principal fator que controla a disponibilidade de Al no solo (Miguel et al., 2010).

Os teores de Al apresentaram diferença para os insumos nas camadas superficiais 0,0–0,05 e 0,05–0,1 m em ambos os anos estudados (Tabela 8), enquanto os menores valores desse elemento foram registrados nos tratamentos com insumos. Esse resultado é explicado pela presença, principalmente do gesso na composição dos insumos, que são conhecidos por reduzir eficientemente o Al trocável em solos com altos teores desse elemento (Crusciol, 2016). É importante destacar que altos teores de Al no solo podem ser prejudiciais para o desenvolvimento das plantas, uma vez que o Al pode se ligar às outras moléculas do solo como: argila, matéria orgânica, fosfatos e cátions essenciais para o crescimento das plantas. Além disso, o Al é um elemento tóxico para as plantas pois compromete o alongamento e a divisão celular, ocasionando em redução do crescimento radicular, que por sua vez, compromete a obtenção de água e nutrientes no subsolo, resultando em menor produtividade das culturas e maior suscetibilidade ao déficit hídrico (Hasnain et al., 2023).

Em relação à (SB), os maiores valores foram encontrados nas camadas superficiais (0–0,2 m) com a aplicação dos insumos (Tabela 8 e 9). Isso sugere que os insumos utilizados podem ser mais eficazes na melhoria da fertilidade do solo e, consequentemente, melhorarem o desenvolvimento das plantas, uma vez que a SB é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. A maior disponibilidade de Ca, Mg e K no solo influencia diretamente a SB, sendo que esse aumento de SB, provavelmente deve-se aos efeitos de ambos os corretivos na melhoria da fertilidade do solo. Além disso, o aumento dos valores de SB, consequentemente aumentam os valores de V. De modo semelhante, houve diferença para V, de acordo com os insumos aplicados e profundidades do solo, com exceção apenas para camada subsuperficial 0,2–0,4 m (Tabela 9).

Tabela 8. Efeito dos tratamentos sobre alguns atributos químicos do solo em amostras coletadas nas camadas de 0,0–0,05 m e 0,05–0,10 m de profundidade após o cultivo da cultura do milho e capim-marandu.

Tratamento	MO		pH CaCl ₂		H + Al		Al		SB		CTC		V	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³						%			
	0,0–0,05 m													
Doses de AS														
0 kg ha ⁻¹	20,0 a	21,7 a	4,5 a	5,0 a	28,0 a	25,1 a	2,2 a	1,0 a	22,5 a	26,6 b	50,5 a	54,4 a	42,5 a	50,7 a
5000 kg ha ⁻¹	18,1 a	21,0 a	4,4 a	5,0 a	27,6 a	26,1 a	2,5 a	0,6 a	21,3 a	24,0 b	46,8 a	54,0 a	41,4 a	48,6 a
10000 kg ha ⁻¹	17,6 a	19,7 a	4,5 a	5,0 a	29,5 a	24,5 a	3,0 a	0,6 a	19,1 a	34,1 a	51,2 a	53,0 a	40,5 a	52,3 a
Insumos														
Com	19,5 a	21,0 a	4,6 a	5,3 a	26,0 b	21,7 b	1,9 b	0,0 b	26,8 a	39,0 a	53,0 a	61,4 a	50,2 a	63,5 a
Sem	17,6 a	20,6 a	4,3 b	4,7 b	30,7 a	28,8 a	3,2 a	1,5 a	15,2 b	18,2 b	45,9 b	46,3 b	32,7 b	37,6 b
Teste F														
Doses (D)	2,6 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,4 ^{ns}	4,2 ^{ns}	1,6 ^{ns}	16,0**	3,5 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}
Insumos (I)	4,1 ^{ns}	0,3 ^{ns}	11,0**	74,8**	11,4**	30,5**	12,6**	151,8**	57,7**	199,7**	24,3**	24,5**	50,2**	52,0**
(D) x (I)	4,2*	0,6 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,8 ^{ns}	4,2*	5,4*	7,2**	3,8*	0,3 ^{ns}	3,4 ^{ns}	1,7 ^{ns}
CV (%)	11,9	11,0	3,9	3,34	12,1	12,6	35,5	39,7	17,8	12,6	7,1	13,9	14,5	17,3
	0,05–0,1 m													
Doses de AS														
0 kg ha ⁻¹	12,4 a	13,6 a	4,3 a	4,5 a	26,1 a	32,1 a	4,6 a	3,9 a	15,9 a	14,0 a	42,1 a	46,3 ab	37,4 a	30,5 a
5000 kg ha ⁻¹	12,1 a	13,1 a	4,4 a	4,5 a	24,7 a	30,1 a	4,0 a	2,7 a	15,4 a	14,8 a	40,1 a	44,4 b	38,0 a	33,4 a
10000 kg ha ⁻¹	13,4 a	13,5 a	4,3 a	4,5 a	27,0 a	32,7 a	5,2 a	3,2 a	21,5 a	16,6 a	48,5 a	50,9 a	41,6 a	34,4 a
Insumos														
Com	12,2 a	13,9 a	4,4 a	4,6 a	24,2 b	30,9 a	3,2 b	2,2 b	23,3 a	18,7 a	47,5 a	50,5 a	48,1 a	39,2 a
Sem	13,0 a	12,9 b	4,2 a	4,4 b	27,7 a	32,4 a	5,4 a	4,3 a	11,9 b	11,5 b	39,6 b	43,9 b	29,9 b	26,3 b
Teste F														
Doses (D)	2,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,1 ^{ns}	3,5 ^{ns}	3,8 ^{ns}	2,8 ^{ns}	2,8 ^{ns}	4,57*	2,2 ^{ns}	0,9 ^{ns}
Insumos (I)	1,9 ^{ns}	6,9*	4,0 ^{ns}	18,5**	7,1*	0,7 ^{ns}	11,0**	35,6**	33,1**	63,0**	6,9*	12,9**	105,0**	27,3**
(D) x (I)	0,3 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	1,4 ^{ns}	5,5*	2,5 ^{ns}	2,5 ^{ns}	5,1*	6,9**	0,6 ^{ns}
CV (%)	10,6	6,9	3,8	3,3	12,6	14,2	38,6	26,0	27,7	14,7	16,8	9,4	11,1	18,4

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. MO = Matéria Orgânica, pH = potencial hidrogênioico, H+Al = acidez potencial, Al = Alumínio SB = Soma de Bases, CTC = Capacidade de Troca Catiônica, V = saturação por bases.

Tabela 9. Efeito dos tratamentos sobre alguns atributos químicos do solo em amostras coletadas nas camadas de 0,1–0,2 m e 0,2–0,4 m de profundidade após o cultivo da cultura do milho e capim-marandu.

Tratamento	MO		pH CaCl ₂		H + Al		Al		SB		CTC		V	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³						%			
	0,1–0,2 m													
Doses de AS														
0 kg ha ⁻¹	11,25 a	11,5 a	4,07 a	4,25 a	30,62 a	35,5 a	7,75 a	5,87 a	12,96 a	12,55 a	43,58 a	48,05 a	29,75 a	26,0 a
5000 kg ha ⁻¹	11,25 a	11,25 a	4,23 a	4,26 a	25,5 a	34,37 a	5,75 a	6,12 a	13,41 a	12,36 a	38,91 a	48,38 a	34,5 a	28,75 a
10000 kg ha ⁻¹	11,37 a	11,37 a	4,23 a	4,25 a	27,5 a	35,87 a	5,78 a	5,87 a	14,96 a	12,65 a	42,46 a	47,22 a	35,37 a	27,87a
Insumos														
Com	11,0 a	11,5 a	4,23 a	4,25 a	26,33 a	37,75 a	5,66 a	5,58 a	16,67 a	14,61 a	43,0 a	51,5 a	38,83 a	29,16 a
Sem	11,58 a	11,25 a	4,13 a	4,25 a	29,41 a	32,75 b	7,25 a	6,33 a	10,88 b	10,42 b	40,3 b	44,27 b	27,58 b	25,91 a
Teste F														
Doses (D)	0,09 ^{ns}	0,37 ^{ns}	1,82 ^{ns}	0,03 ^{ns}	3,08 ^{ns}	0,36 ^{ns}	1,72 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,28 ^{ns}	2,54 ^{ns}	0,46 ^{ns}	1,56 ^{ns}	0,45 ^{ns}
Insumos (I)	4,51 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,55 ^{ns}	0,03 ^{ns}	3,29 ^{ns}	11,19**	2,58 ^{ns}	1,4 ^{ns}	15,57**	174,19**	2,35**	50,02**	16,17**	1,79 ^{ns}
(D) x (I)	0,64 ^{ns}	2,52 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,05 ^{3S}	0,32 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,25 ^{ns}	11,74**	0,58 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,17 ^{ns}
CV (%)	5,95	5,13	4,7	2,71	14,94	10,38	37,38	26,95	26,09	6,21	10,38	5,22	20,63	21,6
	0,2–0,4 m													
Doses de AS														
0 kg ha ⁻¹	10,75 a	10,5 a	4,16 a	4,26 a	33,37 a	37,12 a	8,75 a	7,87 a	13,21 a	12,41 a	46,58 a	49,53 a	29,25 a	26,0 a
5000 kg ha ⁻¹	10,75 a	10,37 a	4,27 a	4,33 a	28,25 a	34,25 a	6,75 a	5,62 a	13,82 a	13,02 a	42,07 a	47,27 a	33,50 a	28,5 a
10000 kg ha ⁻¹	10,87 a	10,62 a	4,21 a	4,35 a	30,25 a	35,35 a	8,62 a	6,5 a	13,67 a	13,12 a	43,92 a	48,37 a	33,12 a	28,12 a
Insumos														
Com	10,5 b	10,5 a	4,15 a	4,27 a	29,5 a	37,58 a	8,16 a	6,91 a	14,7 a	12,72 a	43,95 a	50,3 a	34,58 a	26,33 a
Sem	11,08 a	10,5 a	4,27 a	4,35 a	32,0 a	33,5 a	7,91 a	6,41 a	12,43 b	12,98 a	44,43 a	46,48 a	29,33 a	28,75 a
Teste F														
Doses (D)	0,29 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,42 ^{ns}	2,07 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,36 ^{ns}
Insumos (I)	14,41**	-	2,52 ^{ns}	2,01 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,75 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,3 ^{ns}	6,66*	0,11 ^{ns}	0,03 ^{ns}	2,17 ^{ns}	3,33 ^{ns}	0,88 ^{ns}
(D) x (I)	5,59 ^{ns}	4,4 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,36 ^{ns}
CV (%)	3,48	4,81	4,27	3,33	24,08	21,27	33,07	33,42	15,9	14,82	15,15	13,15	22,04	22,94

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. MO = Matéria Orgânica, pH = potencial Hidrogênio, H+Al = acidez potencial, Al = Alumínio SB = Soma de Bases, CTC = Capacidade de Troca Catiônica, V = saturação por bases.

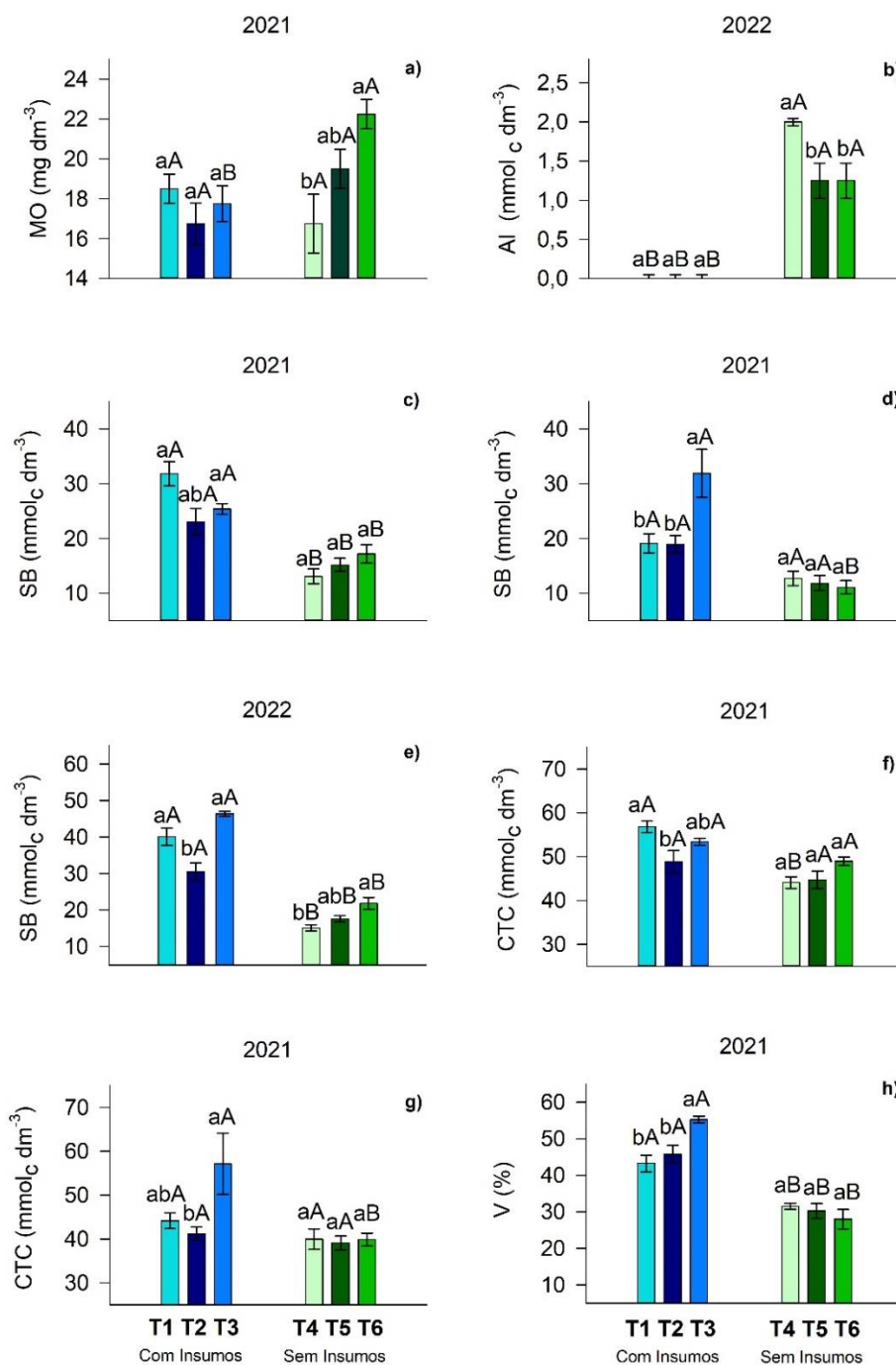


Figura 3. Matéria orgânica (MO) camada 0–0,05 m (a); Valores de alumínio (Al^{3+}) camada 0–0,05 m (b); soma de bases (SB) camada de 0–0,05 m (c,d) e 0,1–0,2 m (e), Capacidade de troca catiônica (CTC) camada de 0–0,05 m (f) e camada 0,05–0,1 m (g) e Saturação por bases (V) camada 0,05–0,1 m (h), em resposta aos tratamentos avaliados: T1 – adubação mineral (AM), calagem (C) e gessagem (G); T2 – AM+C+G+ 5000 kg ha⁻¹ de AS; T3 – AM+C+G+ 10000 kg ha⁻¹ de AS; T4 – 0 kg ha⁻¹ de AS; T5 – 5000 kg ha⁻¹ de AS; e, T6 – 10000 kg ha⁻¹ de AS. Médias seguidas da mesma letra (minúscula entre tratamentos e maiúscula entre modo de aplicação com e sem insumos) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A CTC apresentou diferença em relação aos insumos estudados, com exceção da camada 0,2–0,4 m (Tabela 8 e 9). Observa-se que os insumos promoveram os maiores valores de CTC quando comparado às doses de AS isolado. A redução da acidez potencial e trocável pode ter sido um dos fatores que contribuiu para esse resultado, uma vez que essa redução pode ter aumentado a CTC. Além disso, sabe-se que o Al^{3+} é insolubilizado na forma de hidróxido, o que pode ter levado a um incremento de cargas, resultando na elevação da CTC (Melo et al., 2012).

Para os macronutrientes na camada de 0,0–0,05 m de profundidade, verificou-se interação entre as doses de AS e insumos apenas para S nos dois anos avaliados (Tabela 10 e 11). Para a camada de 0,05–0,1 m houve interação para Ca e Mg apenas para o ano de 2021. Observa-se que os tratamentos com insumos apresentaram o maior teor de S no solo, onde o T3 foi superior aos demais tratamentos no ano de 2021 (Figura 4a). Para o ano de 2022 apenas os tratamentos com a utilização de AS de forma isolada apresentaram diferença, no qual o T5 diferiu dos demais em 0,0–0,05 m de profundidade (Figura 4b). Para o Ca e Mg, também pôde-se notar que o tratamento T3 promoveu a maior disponibilidade desses nutrientes no solo quando comparado às doses de AS (Figura 4c e 4d).

Para o K, com exceção da camada de 0,2–0,4m, houve diferença para os insumos utilizados com maior disponibilidade desse nutriente na utilização de insumos quando comparado às doses de AS isolado (Tabela 10 e 11). Tal fato pode ser explicado devido a utilização da adubação convencional, calagem e gessagem, no qual proporciona maior disponibilidade de K frente a aplicação isolada. Para os tratamentos com insumos, considerando a profundidade de até 0,2 m, os teores disponíveis de K estão na classe de médio (1,6–3,0) para 2021 e baixo (<1,6) para 2022 (Cantarella et al., 2022).

A falta de resposta das doses de AS isoladas pode ser explicada pela característica do mineral silicático, e os teores de K em sua composição (Tabela 1). Nascimento e Loureiro (2004) e Alovisi et al. (2017) também atribuíram esse fator as características do mineral silicático, onde os nutrientes estão constituídos na forma insolúvel, dificultando o processo de liberação ao solo. Todavia, Dalmora et al. (2020) avaliando um subproduto de rocha andesito na cultura de eucalipto não verificou aumento nos teores de K em um Argissolo “pobre” em nutrientes. Esses autores

atribuíram o não incremento de K ao fato de que a dissolução dos minerais contendo esse nutriente é lenta e o tempo de cultivo não foi suficiente para que ocorresse a reação da rocha no solo, embora após nove meses o K disponível no solo fosse maior para o tratamento da rocha do que para NPK. Resultados semelhantes foram obtidos por Ramos et al. (2020) avaliando a quantidade disponibilizada às plantas de Ca, Mg, K e P por diferentes doses do subproduto da rocha dacito aos 70 dias do cultivo de aveia preta e milho. Os autores mostraram que o K fornecido pelo subproduto estava disponível para as plantas.

Em relação ao P, nos dois anos verificou-se diferença entre os insumos apenas para a camada 0,0–0,5 m. Nessa camada, a utilização dos insumos apresentou valores médios maiores (25,33 mg dm⁻³) quando comparado a utilização das doses de AS isoladas (21,08 mg dm⁻³) (Tabela 10). Os teores de P encontrados no solo até a profundidade de 0,2 m, para os dois anos, estão dentro da faixa considerada média (16–40 mg dm⁻³, Cantarella et al., 2022), para culturas anuais. Os resultados indicam que a utilização dos insumos promoveu um aumento nos valores médios de P em 2022 em comparação ao ano 2021 para essa mesma camada do solo.

Os teores de Ca e Mg, com exceção da camada de 0,2–0,4 m, apresentaram influência dos insumos utilizados para os dois anos de estudo (Tabela 10 e 11), sendo que a utilização dos insumos proporcionou os maiores teores de Ca e Mg. Além disso, nota-se que houve aumento de (58,9%) para Ca e (31,59%) para Mg no ano de 2022 e em comparação ao ano de 2021 na camada superficial 0,0–0,05 m. O aumento na disponibilidade Ca é muito importante, uma vez que este nutriente exibe uma função dupla, tanto como componente estrutural das paredes e membranas celulares quanto como segundo mensageiro intracelular (Thor, 2019). O fato de uma maior disponibilidade Mg em função do uso de calcário e gesso é consistente com estudo de Borges et al. (2022), esses autores encontraram aumentos no teor de Mg com a aplicação de gesso em SPD em Argissolo de textura arenosa no Noroeste paulista.

Em relação aos teores de S, houve efeito de doses e de insumos na camada 0,0–0,5m de profundidade (Tabela 10). Verificou-se que a utilização de insumos promoveu teores de S maiores em comparação às doses de AS. Os aumentos no teor de S demonstram a importância de combinar aplicação de gesso com a aplicação calcário para melhorar S, principalmente em profundidade.

Tabela 10. Efeito dos tratamentos sobre os teores de P, K, Ca, Mg e S no solo, em amostras coletadas nas camadas de 0,0–0,05 m e 0,05–0,10 m de profundidade após o cultivo da cultura do milho e capim-marandu.

Tratamento	P-resina		K		Ca		Mg		S	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	mg dm ⁻³		mmolc dm ⁻³				mg dm ⁻³			
	0,0–0,05 m									
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	23,37 a	21,75 a	1,83 a	1,81 a	11,65 a	16,2 a	9,0 ab	12,25 a	8,25 ab	4,0 b
5000 kg ha ⁻¹	25,12 a	22,75 a	2,02 a	1,53 a	10,0 a	14,25 a	7,62 b	12,25 a	6,37 b	6,16 a
10000 kg ha ⁻¹	26,75 a	23,25 a	1,83 a	1,55 a	11,62 a	17,95 a	10,37 a	13,29 a	12,37 a	5,25 a
Insumos										
Com	27,83 a	26,33 a	2,13 a	1,55 a	14,75 a	23,44 a	11,91 a	18,44 a	15,66 a	4,72 b
Sem	22,33 b	18,33 b	1,66 b	1,7 a	7,41 b	8,83 b	6,08 b	6,75 b	2,33 b	5,55 a
Teste F										
Doses (D)	0,89 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,68 ^{ns}	2,05 ^{ns}	1,35 ^{ns}	1,94 ^{ns}	4,6*	0,36 ^{ns}	5,07*	15,62**
Insumos (I)	7,07*	24,72**	9,51**	1,44 ^{ns}	62,05**	90,43**	62,08**	102,13**	71,7**	6,87*
(D) x (I)	0,36 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,01 ^{ns}	3,52 ^{ns}	1,1 ^{ns}	3,13 ^{ns}	1,02 ^{ns}	4,14*	8,52**
CV (%)	20,2	16,36	19,51	18,71	20,57	23,32	20,15	22,5	42,85	15,15
	0,05–0,1 m									
Doses de A										
0 kg ha ⁻¹	24,37 a	24,37 a	1,81 a	1,11 a	8,12 a	8,12 a	6,0 ab	5,37 a	14,37 a	4,5 a
5000 kg ha ⁻¹	23,62 a	26,0 a	1,65 a	1,07 a	8,0 a	7,87 a	5,75 b	5,87 a	12,37 a	5,0 a
10000 kg ha ⁻¹	21,65 a	24,37 a	1,62 a	1,2 a	10,62 a	9,25 a	9,25 a	7,25 a	15,12 a	4,75 a
Insumos										
Com	23,75 a	27,66 a	2,0 a	1,14 a	11,83 a	10,83 a	9,5 a	7,91 a	25,16 a	4,66 a
Sem	22,66 a	22,16 a	1,39 b	1,11 a	6,0 b	6,0 a	4,5 b	4,41 b	2,75 b	4,83 a
Teste F										
Doses (D)	0,2 ^{ns}	0,15 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,34 ^{ns}	3,34 ^{ns}	2,3 ^{ns}	4,29*	1,53 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,62 ^{ns}
Insumos (I)	0,09 ^{ns}	3,84 ^{ns}	37,72**	0,04 ^{ns}	38,93**	75,09**	21,09**	14,87**	50,6**	0,21 ^{ns}
(D) x (I)	1,09 ^{ns}	2,75 ^{ns}	0,13 ^{ns}	1,19 ^{ns}	5,63*	2,73 ^{ns}	5,27*	1,24 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,21 ^{ns}
CV (%)	39,15	28,97	14,3	27,38	25,68	16,23	38,09	36,05	55,3	18,96

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. MO = Matéria Orgânica, pH = potencial Hidrogênionico, H+Al = acidez potencial, Al = Alumínio SB = Soma de Bases, CTC = Capacidade de Troca Catiônica, V = saturação por bases. P = Fósforo. K = Potássio. Ca = Cálcio, Mg = Magnésio. S = Enxofre.

Tabela 11. Efeito dos tratamentos sobre os teores de P, K, Ca, Mg e S no solo, em amostras coletadas nas camadas de 0,1–0,2 m e 0,2–0,4 m de profundidade após o cultivo da cultura do milho e capim-marandu.

Tratamento	P-resina		K		Ca		Mg		S	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³			
	0,1–0,2 m									
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	27,37 a	24,37 a	1,96 a	1,11 a	6,62 a	8,12 a	4,37 a	5,37 a	8,37 a	4,5 a
5000 kg ha ⁻¹	20,0 a	26,0 a	1,66 b	1,07 a	7,37 a	7,87 a	4,37 a	5,87 a	9,25 a	5,0 a
10000 kg ha ⁻¹	22,25 a	24,37 a	1,71 b	1,2 a	8,12 a	9,25 a	5,12 a	7,25 a	9,5 a	4,75 a
Insumos										
Com	25,33 a	27,66 a	2,09 a	1,14 a	9,08 a	10,83 a	5,5 a	7,91 a	13,66 a	4,66 a
Sem	21,08 a	22,16 a	1,46 b	1,11 a	5,66 b	6,0 b	3,75 b	4,41 b	4,41 b	4,83 a
Teste F										
Doses (D)	1,73 ^{ns}	0,14 ^{ns}	8,58**	0,34 ^{ns}	1,35 ^{ns}	2,3 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,53 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,62 ^{ns}
Insumos (I)	1,64 ^{ns}	3,48 ^{ns}	97,32**	0,04 ^{ns}	20,96**	75,09**	5,81*	14,87**	27,29**	0,21 ^{ns}
(D) x (I)	0,64 ^{ns}	2,75 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,2 ^{ns}	2,83 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,24 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,21 ^{ns}
CV (%)	34,98	28,97	8,72	27,38	24,78	8,0	38,45	36,05	47,88	18,96
	0,2–0,4 m									
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	16,0 a	15,62 a	1,83 a	1,28 a	7,25 a	7,0 a	4,12 a	4,12 a	5,75 a	8,37 a
5000 kg ha ⁻¹	15,87 a	14,25 a	1,7 a	1,27 a	7,62 a	7,12 a	4,5 a	4,62 a	7,25 a	7,75 a
10000 kg ha ⁻¹	18,5 a	15,5 a	1,92 a	1,25 a	7,65 a	7,37 a	4,12 a	4,5 a	9,25 a	8,87 a
Insumos										
Com	17,41 a	14,58 a	1,68 a	1,3 a	8,41 a	7,16 a	4,33 a	4,25 a	5,91 a	10,58 a
Sem	16,16 a	15,66 a	1,95 a	1,23 a	6,58 b	7,16 a	4,16 a	4,25 a	8,91 a	6,08 b
Teste F										
Doses (D)	0,29 ^{ns}	0,33 ^{ns}	1,44 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,52 ^{ns}	0,2 ^{ns}
Insumos (I)	0,15 ^{ns}	0,5 ^{ns}	6,33 ^{ns}	1,06 ^{ns}	10,55**	0,0 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,98 ^{ns}	3,33 ^{ns}	9,39**
(D) x (I)	0,69 ^{ns}	1,75 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,38 ^{ns}
CV (%)	46,32	24,74	14,69	14,07	18,43	18,37	17,36	18,64	54,26	43,15

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. MO = Matéria Orgânica, pH = potencial Hidrogênionico, H+Al = acidez potencial, Al = Alumínio SB = Soma de Bases, CTC = Capacidade de Troca Catiônica, V = saturação por bases. P = Fósforo. K = Potássio. Ca = Cálcio, Mg = Magnésio. S = Enxofre.

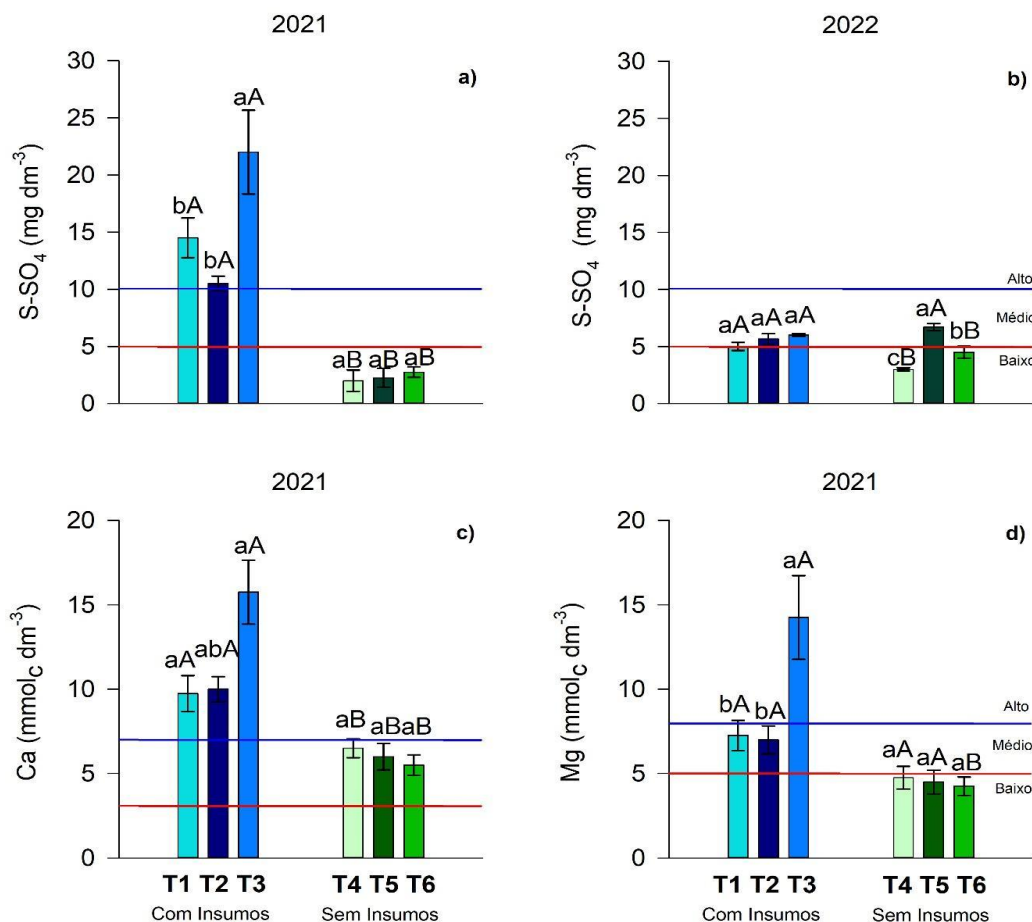


Figura 4. Teores de Enxofre (S) camada 0–0,05 m (a) e (b); Ca– Cálcio camada 0,05–0,1 (c); Mg – Magnésio camada 0,05–0,1 m (d) em resposta aos tratamentos avaliados: T1 – adubação mineral (AM), calagem (C) e gessagem (G); T2 – AM+C+G+ 5000 kg ha⁻¹ de AS; T3 – AM+C+G+ 10000 kg ha⁻¹ de AS; T4 – 0 kg ha⁻¹ de AS; T5 – 5000 kg ha⁻¹ de AS; e, T6 – 10000 kg ha⁻¹ de AS. Médias seguidas da mesma letra (minúscula entre tratamentos e maiúscula entre modo de aplicação com e sem insumos) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Vários estudos já destacaram que a aplicação do gesso agrícola é a melhor estratégia para melhorar o ambiente radicular nos primeiros anos de cultivo, quando os efeitos da calcário ainda não atingiram as camadas subsuperficiais devido à sua baixa solubilidade e mobilidade (Vicensi et al., 2020; Alves et al., 2021). Por outro lado, a dose de 5000 kg ha⁻¹ de AS promoveu os maiores teores de S em comparação ao T4 e T6. Embora o AS não forneça diretamente esses nutrientes às plantas, suas modificações na solução do solo podem facilitar a liberação de compostos orgânicos, sulfatos, sulfetos e outras formas de nutrientes, os quais tendem a aumentar com a degradação da MO.

Os teores de micronutrientes não apresentaram interação entre doses e insumos no ano de 2021 em ambas as camadas avaliadas (Tabela 12 e 13). Por outro lado, para o ano de 2022, o Cu na camada 0–0,05 m e Zn na camada de 0,05–0,1 m, apresentaram interação (Tabela 12).

Tabela 12. Efeito dos tratamentos sobre os teores de B, Cu, Fe, Mn e Zn no solo, em amostras coletadas nas camadas de 0,0–0,05 m e 0,05–0,10 m de profundidade após o cultivo da cultura do milho e capim-marandu.

Tratamento	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
mg dm ⁻³										
0,0–0,05 m										
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	0,11 a	0,15 a	0,66 a	0,85b	58,37 a	56,66 a	21,61 a	18,83 a	2,32 a	2,86 a
5000 kg ha ⁻¹	0,12 a	0,16 a	0,65 a	1,03a	60,12 a	58,5 a	23,5 a	19,42 a	2,47 a	2,86 a
10000 kg ha ⁻¹	0,14 a	0,15 a	0,72 a	1,2a	59,5 a	60,12 a	23,58 a	17,72 a	2,86 a	2,71 a
Insumos										
Com	0,11 a	0,13 b	0,81 a	0,97 a	64,08 a	55,58 a	21,15 a	14,4 b	2,3 a	2,46 b
Sem	0,13 a	0,18 a	0,54 b	1,08 a	54,58 a	61,27 a	24,65 a	22,95 a	2,8 a	3,15 a
Teste F										
Doses (D)	1,01 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,83 ^{ns}	14,56**	0,04 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,18 ^{ns}
Insumos (I)	1,4 ^{ns}	20,67**	29,01**	4,18 ^{ns}	3,13 ^{ns}	1,54 ^{ns}	3,06 ^{ns}	28,10**	1,84 ^{ns}	8,7**
(D) x (I)	0,75 ^{ns}	1,03 ^{ns}	1,52 ^{ns}	3,88*	0,05 ^{ns}	1,29 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,25 ^{ns}
CV (%)	29,8	15,79	18,41	12,61	22,18	19,26	21,41	21,1	34,8	20,42
0,05–0,1 m										
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	0,1 a	0,16 a	0,63 a	1,08 a	52,75 a	52,87 a	20,0 a	15,6 a	1,82 a	2,37 a
5000 kg ha ⁻¹	0,09 a	0,13 a	0,8 a	1,12 a	48,37 a	53,75 a	22,15 a	17,42 a	2,0 a	2,27 a
10000 kg ha ⁻¹	0,09 a	0,14 a	0,78 a	1,23 a	53,0 a	53,62 a	20,86 a	16,13 a	2,11 a	1,92 a
Insumos										
Com	0,08 a	0,14 a	0,86 a	1,19 a	58,75 a	53,91 a	21,96 a	15,15 a	2,21 a	1,98 b
Sem	0,1 a	0,16 a	0,61 b	1,1 a	44,0 b	52,91 a	20,21 a	17,61 a	1,74 b	2,4 a
Teste F										
Doses (D)	0,45 ^{ns}	1,68 ^{ns}	2,57 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1,23 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,85 ^{ns}	2,46 ^{ns}
Insumos (I)	3,17 ^{ns}	2,43 ^{ns}	14,74**	1,02 ^{ns}	15,77**	0,04 ^{ns}	3,19 ^{ns}	2,41 ^{ns}	6,83*	5,73*
(D) x (I)	1,72 ^{ns}	1,15 ^{ns}	0,44 ^{ns}	1,29 ^{ns}	1,83 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1,15 ^{ns}	7,55**
CV (%)	24,13	20,96	21,5	17,6	17,7	21,67	11,37	23,69	22,48	19,44

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. B = Boro. Cu = Cobre. Fe = Ferro. Zn = Zinco.

Os tratamentos T1, T2 e T3 proporcionaram os maiores teores de Cu variando de 0,9 a 1,3 mg dm⁻³ (Figura 5a), e o tratamento T4 os menores valores desse nutriente com teores variando de 0,55 a 0,7 mg dm⁻³ na camada superficial (Figura

5b). Os teores de Cu no solo acima de $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ são considerados altos (Cantarella et al., 2022). Deste modo, observa-se que todos os tratamentos estão na classe alta. Os teores de Zn variaram de 1,67 a $2,5 \text{ mg dm}^{-3}$ nos tratamentos T1, T2 e T3 (Figura 5a) e os tratamentos T4, T5 e T6 variaram de 2,05 a $2,97 \text{ mg dm}^{-3}$ (Figura 5b). Notou-se que os tratamentos se encontram na classe alta de Zn ($> 1,2 \text{ mg dm}^{-3}$), de acordo com Cantarella et al. (2022).

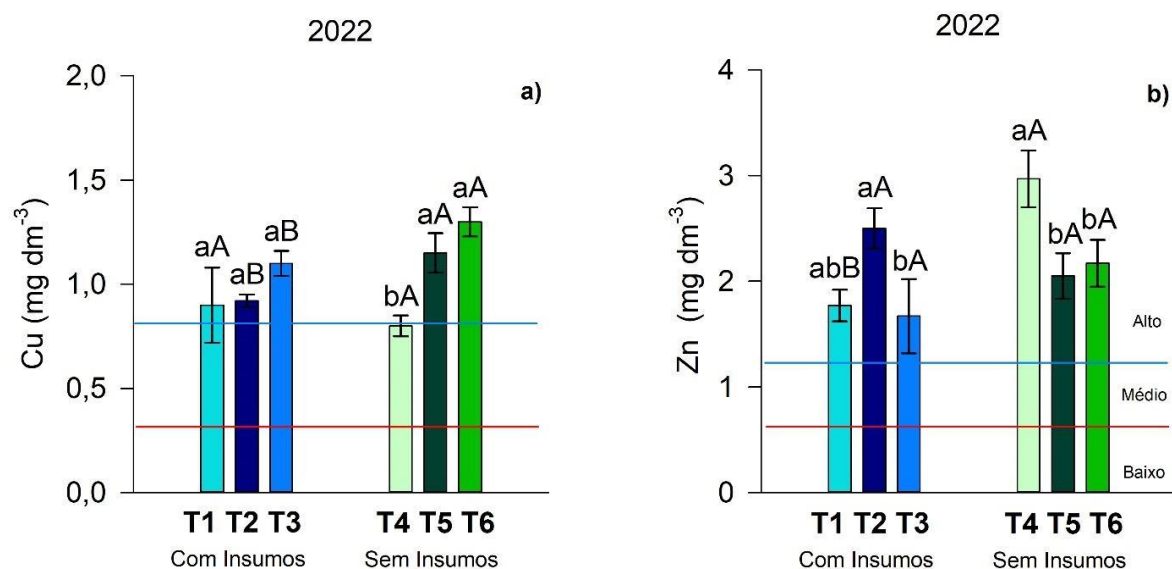


Figura 5. Teores de Cobre – Cu na camada 0–0,05 m (a); Zn– Zinco camada 0,05–0,1 (b) em resposta aos tratamentos avaliados: T1 – adubação mineral (AM), calagem (C) e gessagem (G); T2 – AM+C+G+ 5000 kg ha^{-1} de AS; T3 – AM+C+G+ 10000 kg ha^{-1} de AS; T4 – 0 kg ha^{-1} de AS; T5 – 5000 kg ha^{-1} de AS; e, T6 – 10000 kg ha^{-1} de AS. Médias seguidas da mesma letra (minúscula entre tratamentos e maiúscula entre modo de aplicação com e sem insumos) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O B apresentou diferença em relação aos insumos utilizados apenas para camada superficial 0,0–0,05 m no ano de 2022, sendo que as doses de AS proporcionaram os maiores teores de B quando comparadas com a utilização de insumos (Tabela 12). Os maiores valores de B observados no solo (camadas até 0,2 m de profundidade), estão acima do considerado baixo ($< 0,2 \text{ mg dm}^{-3}$, Cantarella et al., 2022). Esse elemento é essencial para inúmeros processos metabólicos e fisiológicos das plantas, tais como a síntese e lignificação da parede celular, manutenção estrutural da mesma, metabolismo de fenóis, transporte de açúcares e carboidratos (Wang et al., 2022). A deficiência de B poderá acarretar perdas de

produtividades na cultura do milho, mas o excesso poderá trazer toxidez para a maioria das culturas agrícolas acarretando prejuízos.

Os teores de Cu, no ano de 2021, em ambas as camadas apresentaram diferença para os insumos utilizados (Tabela 12). Pode-se notar que a utilização dos insumos proporcionou os maiores teores de Cu quando comparados à utilização das doses de AS. Teores de Cu no solo acima de 0,3–0,8 e <0,8 mg dm⁻³ são considerados médios e altos, respectivamente (Cantarella et al., 2022). Portanto, verificou-se que os teores disponíveis proporcionados pelos tratamentos utilizados se mantiveram dentro das classes médio e alto até a profundidade 0,4 m (Tabela 12 e 13).

Tabela 13. Efeito dos tratamentos sobre os teores de B, Cu, Fe, Mn e Zn no solo, em amostras coletadas nas camadas de 0,1–0,2 m e 0,2–0,4 m de profundidade após o cultivo da cultura do milho e capim-marandu.

Tratamento	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
mg dm ⁻³										
0,1–0,2 m										
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	0,09 a	0,16 a	0,81 a	1,15 a	50,0 a	44,75 a	18,25 a	16,82 a	2,07 a	1,97 a
5000 kg ha ⁻¹	0,09 a	0,14 a	0,75 a	1,15 a	37,0 a	45,87 a	18,67 a	18,21 a	2,08 a	2,13 a
10000 kg ha ⁻¹	0,09 a	0,15 a	0,75 a	1,12 a	42,37 a	40,87 a	18,1 a	17,02 a	2,02 a	2,25 a
Insumos										
Com	0,09 a	0,15 a	0,85 a	1,20 a	48,41 a	46,08 a	18,47 a	17,39 a	2,11 a	2,06 a
Sem	0,10 a	0,15 a	0,69 b	1,07 a	37,83 b	41,58 a	18,2 a	17,31 a	0,0 a	2,17 a
Teste F										
Doses (D)	0,01 ns	0,23 ns	0,89 ns	0,3 ns	2,48 ns	0,62 ns	0,04 ns	0,62 ns	0,02 ns	0,44 ns
Insumos (I)	0,25 ns	0,0 ns	12,92**	1,67 ns	4,88*	1,36 ns	0,03 ns	1,36 ns	0,15 ns	0,2 ns
(D) x (I)	0,65 ns	0,41 ns	0,68 ns	4,4 ns	1,31 ns	0,86 ns	0,06 ns	0,86 ns	1,03 ns	1,29 ns
CV (%)	41,78	30,09	13,99	22,15	27,2	21,53	22,18	21,53	33,51	27,74
0,2–0,4 m										
Doses de AS										
0 kg ha ⁻¹	0,12 a	0,17 a	0,71 a	0,96 a	33,0 a	30,0 a	16,42 a	16,26 a	1,36 a	1,27 a
5000 kg ha ⁻¹	0,11 a	0,16 a	0,67 a	1,0 a	29,5 a	29,12 a	16,32 a	16,62 a	1,37 a	1,48 a
10000 kg ha ⁻¹	0,13 a	0,16 a	0,72 a	0,95 a	29,87 a	27,0 a	15,93 a	17,23 a	1,48 a	1,46 a
Insumos										
Com	0,13 a	0,17 a	0,8 a	1,05 a	34,25 a	28,91 a	16,35 a	16,92 a	1,4 a	1,3 a
Sem	0,11 a	0,16 a	0,6 b	0,89 a	27,33 a	28,5 a	16,1 a	16,49 a	1,4 a	1,51 a
Teste F										
Doses (D)	1,03 ns	0,03 ns	0,87 ns	0,08 ns	0,46 ns	0,38 ns	0,05 ns	0,08 ns	0,26 ns	0,65 ns
Insumos (I)	1,66 ns	0,36 ns	35,58**	2,23 ns	4,45 ns	0,02 ns	0,04 ns	0,04 ns	0,01 ns	1,7 ns
(D) x (I)	2,71 ns	0,65 ns	0,07 ns	0,03 ns	1,17 ns	1,12 ns	1,28 ns	0,22 ns	1,46 ns	0,26 ns
CV (%)	23,99	36,45	11,17	26,76	26,07	24,61	20,77	30,34	27,15	28,91

**, * e ns – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. B = Boro. Cu = Cobre. Fe = Ferro. Zn = Zinco.

O Fe apresentou diferença na camada 0,0–0,05 e 0,05–0,1 m no ano de 2021. Quando comparados os teores de Fe proporcionados com e sem a utilização de insumos, observou-se maiores teores de Fe com a utilização de insumos. Os teores observados são considerados altos ($>12 \text{ mg dm}^{-3}$) conforme Cantarella et al. (2022). Nota-se que o AS apresenta um aporte de micronutrientes em sua composição, principalmente de Fe. Tal fato, pode ter contribuído para a manutenção ou pequeno incremento deste nutriente nos tratamentos T5 e T6, que por sua vez são compostos somente de AS. Todavia, os valores de Fe disponíveis no solo do SAP mantiveram-se altos, destacando as características dos solos tropicais, com altos teores de Óxidos de Fe. Os baixos teores de elementos potencialmente tóxicos do produto não representam risco ambiental, demonstrando um bom potencial para ser utilizado como remineralizador, mantendo a qualidade dos solos.

Para o Mn, os teores disponíveis deste nutriente foram maiores em todas as camadas avaliadas no primeiro ano, enquanto no segundo ano, após o cultivo do milho e do capim-marandu em todas as camadas avaliadas houve redução para doses e insumos (Tabela 12 e 13). Não foram verificadas alterações no limite de interpretação do ano de 2021 para 2022, mantendo-se como teores altos ($> 5 \text{ mg dm}^{-3}$, Cantarella et al., 2022). Nas camadas superficiais (0,0–0,10 m) os menores teores de Mn foram observados para as doses de AS, podendo ser justificado pela atividade hidrogeniônica, uma vez que as doses de AS proporcionaram menores valores de pH para estas camadas. Segundo Malavolta (2006), a disponibilidade de nutrientes é influenciada pela acidez do solo, uma vez que a reatividade dos compostos minerais e a CTC do solo estão diretamente relacionadas à atividade hidrogeniônica. A limitação ao desenvolvimento das plantas decorre, principalmente, dos efeitos indiretos do pH, como o aumento da disponibilidade de Al e de Mn a níveis tóxicos ou a indução de deficiências de Ca, Mg, P, Fe, Cu e Zn, que prevalecem sobre os efeitos diretos do íon H^+ (Marschner, 1995).

Com relação aos teores de Zn, no ano de 2021 notou-se efeito da aplicação dos insumos na camada de 0,05–0,1 m, no qual os teores médios de Zn foram maiores ($2,21 \text{ mg dm}^{-3}$) quando comprado ao efeito isolado da aplicação de AS ($1,74 \text{ mg dm}^{-3}$). Em 2022, observou-se que o efeito isolado da aplicação de AS proporcionou os maiores teores de Zn nas duas camadas 0,0–0,05 m ($3,15 \text{ mg dm}^{-3}$) e 0,05–0,1 m

(2,4 mg dm⁻³) (Tabela 12). Verificou-se também que os teores médios encontrados aumentaram no ano de 2022 quando comparado ao ano de 2021. Por outro lado, não houve efeito dos tratamentos nos teores de Zn nas camadas 0,1–0,2 m e 0,2–0,4 m (Tabela 13). Solos sob sistemas conservacionistas de preparo do solo (ou seja, sem revolvimento ou mobilização restrita às linhas de semeadura ou plantio), como as áreas de pastagem e SPD tendem a acumular nutrientes na superfície do solo (Comim et al., 2018). A solubilidade do Zn é conhecida por ser mais sensível ao pH, tal fato justifica menor disponibilidade de Zn no primeiro ano de cultivo, no qual o solo apresentou maior acidez nas camadas analisadas.

A integração de diferentes espécies de pastagens e áreas sob cultivos de grãos em plantio direto, tem aumentado a complexidade dos agroecossistemas tropicais, refletindo em mudanças nos métodos de avaliação da qualidade do solo, com reflexo no manejo e na adubação como um todo e não apenas na sua condição química. Assim, a inserção de gramíneas forrageiras neste sistema tem proporcionado maior aporte de resíduos vegetais e promovido a proteção do solo como uma cobertura viva durante a estação seca auxiliando na produção de palhada, fundamental para o sistema e para construção de um ambiente edáfico biologicamente mais ativo e saudável, reciclando nutrientes presentes nas camadas do solo (Nicolodi et al., 2008).

Este processo é particularmente evidente para Cu e Zn presentes em fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais utilizados nestes sistemas de produção. Portanto, é necessário monitorar os teores de Cu e Zn nas camadas superficiais do solo ao longo do tempo, comparando os teores disponíveis com os valores exigidos pelas plantas, ou mesmo níveis críticos de toxicidade e transferência no solo e águas superficiais e subterrâneas (Ferreira et al., 2023).

No presente estudo, os resultados obtidos após 8 e 16 meses da aplicação do agromineral silicático associado ou não a condicionadores do solo e adubação convencional foi muito próximo ao observado inicialmente, não indicando que tenha ocorrido maior solubilização do basalto e liberação de macro e micronutrientes com o aumento do período do produto no solo.

4.3 Indicadores biológicos do solo e BioAS

A atividade enzimática do solo após a aplicação dos tratamentos não apresentou interação para as doses de AS e os insumos utilizados. Por outro lado, houve diferença com relação à aplicação de insumos no ano de 2022 (Tabela 14). Foi possível notar também que os valores médios de β -glucosidase e arilsulfatase aumentaram em 2022 em comparação ao ano de 2021, sendo observado aumento de 138% para a arilsulfatase.

Esta diferença de padrão enzimático pode estar relacionada com as mudanças das características físicas e químicas apresentadas neste solo após o cultivo de milho e capim-marandu, na qual, a pequena alteração nas atividades das enzimas proporcionada pelas doses de AS, refletem a menor atividade enzimática quando comparado aos outros tratamentos. Esse fato pode ser explicado pela menor disponibilidade de nutrientes, que refletiu em menor crescimento e desenvolvimento das plantas quando comparados aos demais tratamentos. As enzimas analisadas são sensíveis a mudanças no comportamento dos microrganismos que por sua vez são diretamente influenciados pelo material vegetal produzido pelas plantas em forma de raízes, caules, e frutos, proteção do solo e reciclagem de nutrientes.

Tabela 14. Efeitos dos tratamentos na atividade das enzimas Arilsulfatase e β -glucosidase em amostras de solo coletadas na camada 0–0,1m de profundidade.

Tratamento	Arilsulfatase		β -glucosidase	
	2021	2022	2021	2022
	$\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$			
Doses de AS				
0 t ha ⁻¹ de AS	8,09 a	19,87 a	31,82 a	29,15 a
5 t ha ⁻¹ de AS	10,03 a	21,95 a	31,38 a	32,00 a
10 t ha ⁻¹ de AS	12,51 a	23,63 a	29,63 a	32,27 a
Insumos				
Com	10,82 a	25,76 a	31,99 a	34,44 a
Sem	9,61 a	17,87 b	29,9 a	27,84 b
Teste F				
Doses (D)	2,93 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,1 ^{ns}	1,08 ^{ns}
Insumos (I)	0,66 ^{ns}	12,96**	0,25 ^{ns}	11,82**
(D) x (I)	0,61 ^{ns}	1,8 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,34 ^{ns}
CV (%)	35,76	24,6	32,99	15,11

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS.

De modo geral, a atividade enzimática em solos arenosos, se revela baixa em relação a outros solos agrícolas reportados na literatura, principalmente os argilosos. Este fato indica que estas áreas necessitam de um processo de recuperação físicas, químicas e biológicas do solo. A atividade enzimática de um solo também é representada pela atividade enzimática das plantas, microrganismos e animais ali presentes, somados a atividade da fração não viva (encontram-se acumuladas no solo, protegidas pelas proteases, adsorvidas na matéria orgânica, partículas de argila e na matéria orgânica), portanto a atividade das enzimas arilsulfatase e β -glucosidase, assemelham-se ao comportamento da MOS o que permite acessar o histórico do solo e criar índices de qualidade do solo, como a BioAS (Mendes et al., 2021).

Ainda de acordo com Mendes et al. (2021), o ativo BioAS consiste na geração de escores e um índice conhecido como IQSFertbio. Ademais, o uso dessa tecnologia deve-se ao fato de que nem sempre as alterações nas propriedades químicas, em particular os teores de MOS, são capazes de identificar as modificações que ocorrem no solo em função da adoção de manejos conservacionistas como o SAP. Contudo, áreas com características químicas semelhantes, podem apresentar componente biológico completamente distintos. Dessa forma, a maior vantagem dos bioindicadores é que eles são mais sensíveis que os indicadores químicos e físicos, por detectar com maior antecedência as alterações que ocorrem no solo, em função do seu uso e manejo.

O IQSFertbio e os escores da função F2 (armazenar) apresentaram índices muito altos ($>0,6$) para todos os tratamentos (Tabela 15). Tal fato pode ser explicado pela possível estabilização do sistema, por ser um sistema sem revolvimento de solo há mais de 12 anos, pois a função F2 corresponde ao armazenamento de nutrientes e está relacionada principalmente ao conteúdo da matéria orgânica do solo (MOS). Para o IQSFert o tratamento T1 e T3 encontra-se na classe muito alto para o ano de 2021. Todavia, para o ano de 2022 o T2 apresentou uma mudança de classe, saindo da classe alto para muito alto, enquanto o T3 manteve-se nesta classe nos dois anos estudados (Tabela 15). Esses índices auxiliam nas tomadas de decisões relacionadas aos sistemas de manejo adotados nas propriedades agrícolas.

Na função ciclar (F1), houve uma mudança de classe para o ano 2022, no qual os tratamentos apresentam-se na classe médio e foram alterados para classe alto,

com exceção do T4 e T6 que se manteve na classe médio. Como relatado por Mendes et al. (2022), os escores do IQSBio e da função F1 (ciclar nutrientes) são semelhantes, o que corrobora com os resultados encontrados na presente pesquisa.

Tabela 15. Efeito dos tratamentos sobre atividade enzimática, matéria orgânica do solo, escores dos índices de qualidade do solo (IQS) – IQSFertbio, químico e biológico e das funções do solo (ciclar, armazenar e suprir nutrientes) na camada de 0,0–0,1 m de profundidade, após o cultivo das plantas de milho e do capim-marandu no sistema agropastoril.

Trat	Aril	β -glic	MOS	IQSFertbio	IQSBio	IQSFert	F1 Ciclar	F2 Armazenar	F3 Suprir
2021									
T1	8,50	32,25	15,5	0,71	0,49	0,81	0,49	1,00	0,63
T2	11,75	32,00	14,25	0,71	0,52	0,8	0,52	0,99	0,62
T3	12,0	31,50	15,25	0,72	0,52	0,82	0,52	0,99	0,64
T4	7,50	31,25	14,5	0,68	0,46	0,78	0,46	0,98	0,59
T5	8,50	30,75	16,25	0,69	0,48	0,81	0,48	1,00	0,61
T6	12,75	27,50	17,75	0,69	0,51	0,79	0,51	1,00	0,57
2022									
T1	25,0	34,50	17,5	0,76	0,67	0,8	0,67	1,00	0,61
T2	23,0	33,25	17,5	0,78	0,66	0,84	0,66	1,00	0,67
T3	29,0	35,75	17,25	0,78	0,72	0,82	0,72	1,00	0,64
T4	14,75	24,00	17,00	0,68	0,49	0,78	0,49	1,00	0,57
T5	20,75	30,50	17,50	0,71	0,62	0,75	0,62	1,00	0,5
T6	18,00	28,75	16,00	0,71	0,57	0,78	0,57	1,00	0,57

Trat: Tratamentos; Aril: Arilsulfatase; Beta: β -glucosidase; MOS: Matéria orgânica do solo; IQSFertbio: Índice de Qualidade do Solo; IQSBio: Índice de qualidade do solo biológico; IQSFert: Índice de qualidade do solo químico; F1: Ciclagem de nutrientes; F2: Armazenamento de nutrientes; F3: Suprimento de nutrientes. T1 – adubação mineral (AM), calagem (C) e gessagem (G); T2 – AM+C+G+ 5000 kg ha⁻¹ de AS; T3 – AM+C+G+ 10000 kg ha⁻¹ de AS; T4 – 0 kg ha⁻¹ de AS; T5 – 5000 kg ha⁻¹ de AS; e, T6 – 10000 kg ha⁻¹ de AS. ■ Verde escuro – Muito alto 0,81 a 1,0; ■ Verde – Alto 0,61 a 0,81; ■ Amarelo – Médio 0,41 a 0,6; ■ Laranja – Baixo 0,21 a 0,4; e, ■ Vermelho – Muito baixo 0,0 a 0,2.

A inclusão de pastagem nos sistemas de rotação de culturas envolve a incorporação de MO no solo por meio de resíduos vegetais. Durante o crescimento das plantas, são aproveitados os benefícios da correção do solo e da adubação residual aplicadas na safra anterior. Como resultado, a sucessão e/ou rotação de culturas entre as safras contribui para o condicionamento físico do solo por meio das raízes das plantas e da cobertura vegetal proporcionada pela pastagem. Essa prática traz inúmeros benefícios para a qualidade do solo, como melhor retenção de água, melhor estruturação, aumento da atividade biológica e maior capacidade de suporte às plantas. A incorporação de pastagem na rotação de culturas é uma prática crucial para manter a produtividade agrícola e preservar a saúde do solo a longo prazo.

A atividade enzimática apresenta relação direta com a qualidade do solo. Esses bioindicadores demonstram um grande potencial para avaliar impactos de manejo do solo para com os atributos físicos, químicos e biológicos, caracterizando uma estratégia viável para melhorar produtividade de forma sustentável, proporcionando maiores rendimentos de grãos, parâmetro que reflete o aspecto econômico das lavouras, que é fundamental para a sustentabilidade do agronegócio. Os microrganismos desempenham diversas funções no solo, como a ciclagem de nutrientes e a transformação de moléculas orgânicas. Portanto, a chave para o manejo de solos em sistemas pecuários é criar um ambiente favorável para o desenvolvimento da atividade biológica (Santos et al., 2022).

4.4 Avaliações das culturas

4.4.1 Teores de macro e micronutrientes na folha de milho

Os teores de macro e micronutrientes na folha diagnose do milho não apresentaram interação para as doses de AS e insumos (Tabela 16). Um fator a ser considerado é a influência das condições climáticas durante o período de cultivo (Figura 2), que pode ter afetado a absorção e a utilização dos nutrientes pela planta. A disponibilidade de nutrientes no solo é influenciada pela temperatura, umidade e luminosidade, entre outros fatores ambientais (Pontes et al., 2018). Em relação aos macronutrientes, com exceção do P, observou-se diferença para os insumos (Tabela 16), no qual os teores de N, K, Ca, Mg e S foram maiores com a utilização dos insumos em comparação à aplicação das doses isoladas de AS.

Com exceção do N e do Mg, verificou-se que os teores de macronutrientes não foram mantidos dentro da faixa considerada adequada para o bom estado nutricional da cultura do milho de acordo com os teores descritos por Malavolta et al. (1997). Tal fato pode ser justificado pela baixa disponibilidade de nutrientes no solo, pois o acúmulo de N está relacionado aos teores disponíveis de Ca no solo, responsável pelo fortalecimento dos tecidos da planta, principalmente raízes e folhas, que associados aos teores de Mg disponíveis, proporcionam melhor desenvolvimento vegetal. Ressalta-se que o Mg é um componente essencial para a clorofila, pigmento responsável pela fotossíntese da planta (Farhat et al., 2016).

Em relação às doses de AS, uma das desvantagens do uso do AS isolado é a ausência do fornecimento de N, e a lenta liberação de nutrientes (Hanisch et al., 2013). Considerando o não fornecimento de N pelos remineralizadores de solo, se faz necessário a complementação desse nutriente com fontes minerais e orgânicas, exceto em culturas que realizam a fixação biológica de N₂ (FBN). Além disso, as quantidades fornecidas de fertilizantes minerais e/ou AS não foram suficientes para suprir a demanda nutricional da cultura de milho. Tal fato foi observado para os nutrientes N, Mg e Cu (Tabela 16). Todavia, imagina-se que a principal causa para os menores teores foliares tenham sido em virtude do déficit hídrico ocorrido ao longo do cultivo das plantas. Mesmo assim, não foram identificados sintomas visuais de deficiência ou excesso de nutrientes.

Alguns autores não observaram efeito significativo no desenvolvimento de algumas culturas, como soja e trigo quando utilizaram doses de AS (Hanish et al., 2013; Gotz et al., 2019), corroborando com os resultados desse estudo. De acordo com Silva et al. (2020), o uso do agromineral silicático como fonte de nutrientes para as plantas, ainda apresenta limitações quanto às doses aplicadas e este fator está atrelado ao fator econômico. Contudo, os custos, especialmente os logísticos, podem tornar inviável a aplicação de doses mais elevadas.

Os micronutrientes apresentaram diferença para os insumos utilizados nos teores foliares de Fe e Mn. Observou-se que, de modo geral, quando comparados às doses isoladas de AS, a utilização dos insumos possibilitou os maiores teores foliares desses micronutrientes. Comparando os teores disponíveis com os valores exigidos pelas plantas, ou mesmo níveis críticos de toxicidade, notamos que os teores de Cu e Zn proporcionados pelos tratamentos utilizados estavam abaixo do limite permitido para a cultura do milho (20–50 mg kg⁻¹). Cabe-se ressaltar que, no solo, os maiores teores de macro e micronutrientes foram encontrados nos tratamentos com insumos quando comparados às doses de AS isolado.

Esses insumos podem ter contribuído para um aumento no fornecimento de nutrientes no solo, o que pode ter melhorado a absorção pelas plantas. Adicionalmente, é importante destacar que os insumos utilizados incluíram calagem, gessagem e adubação mineral convencional, além da associação com doses de AS.

Tabela 16. Efeito dos tratamentos e insumos nos teores de macro e micronutrientes na folha diagnose da cultura do milho cultivado no ano de 2022.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Doses de AS											
0 kg ha ⁻¹	19,67 a	2,27 a	20,51 a	2,01 a	0,95 a	2,1 a	9,23 a	3,5 a	103,87 a	77,12 a	17,12 a
5000 kg ha ⁻¹	22,52 a	2,22 a	18,79 a	2,04 a	0,99 a	2,06 a	9,19 a	3,62 a	95,5 a	84,25 a	16,62 a
10000 kg ha ⁻¹	20,34 a	2,25 a	20,51 a	2,12 a	1,0 a	2,09 a	9,05 a	3,25 a	95,0 a	75,87 a	16,37 a
Insumos											
Com	25,59 a	2,29 a	20,53 a	2,57 a	1,11 a	2,46 a	9,11 a	3,5 a	117,66 a	104,16 a	16,83 a
Sem	16,1 b	2,11a	18,39 b	1,55 b	0,86 b	1,7 b	9,2 a	3,41 a	78,58 b	56,0 b	16,58 a
Teste F											
Doses (D)	2,4 ^{ns}	0,12 ^{ns}	3,15 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,56 ^{ns}	1,29 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Insumos (I)	73,03**	1,04 ^{ns}	12,64**	70,68**	12,16**	72,65**	0,02 ^{ns}	0,06 ^{ns}	25,91**	57,86**	0,04 ^{ns}
(D) x (I)	0,6 ^{ns}	0,12 ^{ns}	3,57 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,41 ^{ns}	2,45 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,9 ^{ns}
CV (%)	13,05	8,78	7,58	14,46	17,65	10,38	18,42	24,71	19,16	19,36	17,87
Teores adequados	25–35	1,9–3,5	17–30	2,5–6,0	1,5–4,0	1,5–3,0	7–17	6–15	70–200	40–100	20–50

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. ⁽¹⁾ Faixa de teores adequados de nutrientes em folhas de milho (Duarte et al., 2022).

A calagem e a gessagem são técnicas amplamente utilizadas na correção da acidez do solo promovendo melhoria da disponibilidade de nutrientes às plantas (Alleoni et al., 2005). O fornecimento de nutrientes resultante da utilização desses insumos pode ter contribuído para o aumento dos teores foliares de macro e micronutrientes observados no presente estudo.

4.4.2 Desenvolvimento das plantas, componentes de produção e produtividade

Para as variáveis altura de planta (AP), altura de inserção da primeira espiga (APE), diâmetro do colmo (DC), número de fileira por espiga (NFE), número de grãos por espiga (NGE) e massa de mil grãos (MMG) não houve interação entre os insumos e as doses de AS utilizadas cultura do milho (Tabela 17). No entanto, houve diferença para a utilização dos insumos, com exceção do DC e MMG. Os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram os maiores valores em comparação aos demais tratamentos. Isso sugere que a aplicação desses insumos pode ter contribuído para um melhor desenvolvimento e crescimento das plantas de milho, resultando em uma maior produtividade de grãos. Esses resultados podem ser explicados pela produção e incorporação de mais fotoassimilados, fatores que afetam diretamente a altura da planta e o desenvolvimento, os quais se correlacionam positivamente com a produtividade da cultura (Kumar et al., 2019).

Os resultados indicam que a utilização isolada do AS deve ser evitada pois a liberação lenta de nutrientes associada a fatores edafoclimáticos pode comprometer a disponibilidade de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas de milho (Tabela 17). Assim, a calagem, a gessagem e a adubação mineral associado à aplicação de doses de AS, apresenta-se como a melhor opção para manter o adequado desempenho agrônomo da cultura de milho e, conseqüentemente, garantir uma melhor rentabilidade para os produtores.

Em relação às doses de AS isoladas, poucos trabalhos mostram pesquisas com remineralizadores do solo em sistema agropastoril. Alovisei et al. (2020) ao avaliar pó de basalto e serpentinito, verificaram que as variáveis: tamanho de espiga, diâmetro de espiga e número de fileiras de grãos de milho não melhoraram em função das doses utilizadas. Em vista desses resultados, é importante ressaltar a necessidade de mais estudos que busquem avaliar doses de agrominerais em sistema agropastoril, a

fim de se compreender melhor sua influência sobre o desempenho das culturas. Além disso, é fundamental considerar os aspectos econômicos e ambientais envolvidos no uso desses insumos, visando a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e rentáveis.

Tabela 17. Efeito dos tratamentos no desenvolvimento das plantas de milho cultivadas no ano de 2022.

Tratamento	AP	APE	DC	NFE	NGF	NGE	MMG
	—— cm ——		— mm —				— g —
Doses de AS							
0 kg ha ⁻¹	124,31 a	58,11 a	1,77 a	15,05 a	22,81 a	351,34 a	162,95 a
5000 kg ha ⁻¹	123,05 a	57,7 a	1,78 a	15,38 a	24,33 a	382,75 a	181,44 a
10000 kg ha ⁻¹	120,5 a	57,03 a	1,83 a	14,77 a	24,88 a	377,56 a	171,64 a
Insumos							
Com	146,57 a	70,56 a	1,95 a	16,37 a	28,47 a	468,22 a	179,92 a
Sem	98,67 b	44,67 b	1,64 a	13,76 b	19,54 b	273,53 b	164,77 a
Teste F							
Doses (D)	0,05 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,67 ^{ns}
Insumos (I)	84,27**	71,3**	35,08 ^{ns}	36,55**	26,42**	38,8**	1,51 ^{ns}
(D) x (I)	0,45 ^{ns}	0,33 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,42 ^{ns}
CV (%)	11,98	11,33	7,22	7,01	17,72	20,64	17,54

** e ^{ns} – Significativo a 1 % de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS. AP = Altura de plantas. APE = Altura da primeira espiga. DC = Diâmetro do colmo, NFE = Número de fileiras por espiga. NGF = Número de grãos por fileira. NGE = Número de grãos por espiga. MMG = Massa de mil grãos.

4.5 Produtividade do milho e produção da fitomassa do capim-marandu

A produtividade de grãos de milho e produtividade de biomassa de capim-marandu coletada aos 60 dias após a colheita do milho (150 DAE) não apresentaram interação entre às doses de AS e os insumos (Tabela 18). No entanto, observou-se que a utilização dos insumos resultou na maior produtividade das culturas avaliadas em comparação à aplicação isolada de AS. Além disso, houve diferença para doses isoladas de AS na produção de biomassa do capim, sendo que a produtividade do capim foi maior na dose de 10000 kg ha⁻¹. As doses de AS não foram capazes de disponibilizar nutrientes em quantidade suficiente para ambas as culturas de modo que a produtividade superasse a adubação mineral convencional.

A maior produtividade expressada pelas plantas submetidas à utilização dos insumos era esperada, uma vez que o uso de calcário, gesso e fertilizantes minerais aumentam os teores de nutrientes disponíveis às plantas, favorecendo os processos

fisiológicos e nutricionais, e consequentemente, aumentando a produtividade de grãos. Apesar da utilização dos insumos, a produtividade do milho na safra 2021/22 não alcançou a média do Estado de São Paulo (5955 kg ha⁻¹) ou a média nacional (5499 kg ha⁻¹) (CONAB, 2023). Esperava-se uma produtividade superior devido ao uso desses insumos em SAP estabilizado por mais de 10 anos.

Tabela 18. Efeito dos tratamentos sobre a produtividade dos grãos de milho e produção de matéria seca do capim-marandu no ano de 2022.

Tratamento	Milho	capim-marandu
		kg ha ⁻¹
Doses de AS		
0 t ha ⁻¹ de AS	3148,25 a	2564,84 b
5 t ha ⁻¹ de AS	3502,64 a	2993,36 ab
10 t ha ⁻¹ de AS	3219,42 a	3063,84 a
Insumos		
Com	4330,28 a	3073,13 a
Sem	2249,92 b	2674,9 b
Teste F		
Doses (D)	0,68 ^{ns}	4,61*
Insumos (I)	63,16**	7,52*
(D) x (I)	0,28 ^{ns}	1,64 ^{ns}
CV (%)	19,48	12,37

**, * e ^{ns} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral + AS.

Em relação às doses de AS, poucos trabalhos mostram pesquisas com remineralizadores do solo em sistema agropastoril. Alovisei et al. (2020) ao avaliar pó de basalto e serpentinito, verificaram que as variáveis, tamanho de espiga, diâmetro de espiga e número de fileiras de grãos de milho não melhoraram em função das doses utilizadas. Em vista desses resultados, é importante ressaltar a necessidade de mais estudos que busquem avaliar doses de agrominerais em sistema agropastoril, a fim de se compreender melhor sua influência sobre o desempenho das culturas. Além disso, é fundamental considerar os aspectos econômicos e ambientais envolvidos no uso desses insumos, visando a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e rentáveis.

4.6 Exportação de nutrientes nos grãos de milho

Os macros e micronutrientes exportados pelos grãos de milho, não apresentaram interação entre às doses de AS e os insumos. No entanto, houve diferença para as quantidades exportadas de macro e micronutrientes em relação aos insumos utilizados (Tabela 19), no qual, a exportação de nutrientes foi maior nos tratamentos com insumos, em comparação as doses de AS isolado. Esses resultados eram esperados, uma vez que o estado nutricional da cultura também não apresentou interação entre os fatores. O fato da maior exportação de nutriente observados com utilização de insumo deve-se a composição desses tratamentos, no qual apresentavam adubação mineral convencional, calagem, gessagem e doses de AS, consequentemente contribuindo para uma maior resposta na extração e exportação de nutrientes.

Tabela 19. Efeito dos tratamentos nas quantidades exportadas de macro e micronutrientes nos grãos de milho.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg ha ⁻¹						g ha ⁻¹				
Doses de AS											
0 kg ha ⁻¹	48,26 a	7,14 a	13,26 a	2,18 a	0,90 a	3,82 a	13,76 a	4,16 a	14,96 a	9,34 a	58,24 a
5000 kg ha ⁻¹	50,81 a	8,54 a	14,94 a	2,34 a	1,26 a	4,94 a	14,04 a	5,02 a	23,24 a	12,19 a	65,21 a
10000 kg ha ⁻¹	50,07 a	8,73 a	14,52 a	2,16 a	1,51 a	4,52 a	16,06 a	4,06 a	23,08 a	14,62 a	69,46 a
Insumos											
Com	65,83 a	10,86 a	18,62 a	2,96 a	1,64 a	5,94 a	19,21 a	5,77 a	28,25 a	16,32 a	80,25 a
Sem	33,60 b	5,41 b	9,86 b	1,50 b	0,81 b	2,92 b	10,03 b	3,05 b	12,60 b	7,79 b	48,35 b
Teste F											
Doses (D)	0,09 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,89 ^{ns}	1,46 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,35 ^{ns}
Insumos (I)	42,24**	24,28**	31,46**	59,10**	4,81*	31,49**	24,05**	12,33**	8,74**	6,31*	8,34*
(D) x (I)	0,44 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,36 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,57 ^{ns}	1,65 ^{ns}	0,37 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,78 ^{ns}
CV (%)	24,46	33,30	26,85	20,77	74,97	29,69	31,32	42,94	63,43	68,97	42,07

**, * e ns – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral + AS.

Conhecer a demanda nutricional das culturas é essencial para garantir o desenvolvimento e rendimento adequado das plantas, além de promover a adequada reposição de nutrientes de acordo com o nível de produtividade esperada, que somente será expressa em função da fertilização adequada e da eficiência técnica e econômica (Lacerda et al., 2015). Além disso, é importante ressaltar que a fonte de nutrientes pode ser um fator determinante para a sustentabilidade da atividade, destacando-se que o uso de remineralizadores de solo como o AS pode auxiliar na

reposição de nutrientes, porém, não é uma fonte única e completa de nutrientes, sendo necessário a complementação com outras fontes para atender as demandas nutricionais das culturas.

Estes resultados corroboram com estudos que avaliaram o efeito do uso de remineralizadores de solo na produção de grãos de milho. Maia et al. (2020) não encontraram diferença na exportação de nutrientes pelos grãos de milho em função da aplicação de pó de basalto. De modo similar, Souza et al. (2019) verificaram que a adição de rochas fosfatadas não afetou a exportação de nutrientes pelos grãos de milho em um Latossolo Vermelho. É importante ressaltar que, apesar dos resultados apresentados, estudos futuros devem ser realizados a fim de entender melhor os mecanismos envolvidos na interação entre os insumos e as doses de AS, a fim de se identificar as melhores formas de utilização desses remineralizadores do solo para melhorar o desempenho agrônômico das culturas.

4.7 Acúmulo de nutrientes na parte aérea do capim-marandu

Para o acúmulo de macro e micronutrientes na biomassa seca do capim-marandu, não foi observado interação entre as doses e insumos utilizados (Tabela 20). Para os insumos utilizados, observou-se diferença no qual os tratamentos com insumos foram superiores às doses isoladas de AS (Tabela 20). O acúmulo de nutrientes na biomassa do capim-marandu está diretamente relacionado à fertilidade do solo e as práticas de manejo adotadas, como a adubação e a rotação de culturas. Contudo, fatores externos as plantas podem ter influenciado diretamente na resposta aos micronutrientes, explicando assim os efeitos e resultados observados.

Os nutrientes Ca e Mg são responsáveis pelo fortalecimento dos tecidos da planta, principalmente raízes e folhas, que por sua vez proporcionam melhor desenvolvimento vegetal, pois o Mg é um componente essencial para a clorofila, pigmento responsável pela fotossíntese da planta. O enxofre em uso conjunto com o N em forrageiras, reduz o teor de nitrato, cujo excesso é prejudicial aos animais (Malavolta et al., 2006).

O acúmulo adequado de nutrientes na biomassa do capim-marandu pode reduzir a necessidade de fertilizantes minerais, reduzindo os custos de produção e minimizando os impactos ambientais associados ao uso excessivo de fertilizantes.

Além disso, a biomassa rica em nutrientes pode ser utilizada na alimentação do gado, contribuindo para uma dieta balanceada e saudável. A ciclagem de nutrientes pelo capim-marandu é essencial para manter a fertilidade do solo e garantir a produtividade da pastagem, já que o capim retira nutrientes do solo durante seu crescimento e posteriormente os devolve, em parte, por meio da decomposição da biomassa.

Tabela 20. Efeito dos tratamentos e insumos nos teores de macro e micronutrientes na biomassa seca do capim-marandu no ano de 2022.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg ha ⁻¹						g ha ⁻¹				
Doses de AS											
0 kg ha ⁻¹	52,20 a	7,84 a	78,66 a	6,13 a	8,69 a	3,86 a	30,09 a	13,12 a	678,63 a	698,78 a	93,02 a
5000 kg ha ⁻¹	56,16 a	8,13 a	89,91 a	6,50 a	9,84 a	3,77 a	30,20 a	15,14 a	764,90 a	766,96 a	115,62 a
10000 kg ha ⁻¹	50,75 a	9,66 a	85,53 a	6,75 a	9,09 a	3,42 a	30,38 a	14,82 a	664,55 a	715,19 a	110,90 a
Insumos											
Com	71,94 a	5,93 a	114,84 a	9,34 a	11,25 a	2,16 a	37,93 a	19,23 a	894,74 a	932,87 a	137,06 a
Sem	34,13 b	5,93 b	54,55 b	3,56 b	7,16 b	5,21 b	22,52 a	9,49 b	510,64 b	521,08 b	75,96 b
Teste F											
Doses (D)	0,50 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,57 ^{ns}
Insumos (I)	68,6**	24,12**	43,90**	38,71**	23,74**	4,58**	19,47**	36,20**	25,29**	16,77**	11,18**
(D) x (I)	0,04 ^{ns}	1,25 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,11 ^{ns}	1,42 ^{ns}	1,38 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,05 ^{ns}
CV (%)	21,08	30,50	26,31	35,24	22,27	29,10	28,28	27,58	26,62	33,88	42,03

** e ^{ns} – Significativo a 1 % de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sem insumos = somente aplicação de doses de agromineral silicático (AS). Com insumos = calagem + gessagem + adubação mineral convencional + AS.

Por fim, estudos que avaliam a qualidade do solo em sistemas agropastoris são fundamentais para a compreensão da dinâmica de nutrientes e para o desenvolvimento de práticas de manejo sustentáveis que garantam a produtividade e a saúde do solo a longo prazo. Por isso, é fundamental que estudos continuem sendo realizados para avaliar a qualidade do solo em sistemas agropastoris e a influência de diferentes práticas agrícolas, incluindo a aplicação de remineralizadores do solo, na manutenção da fertilidade do solo e no aumento da produtividade agrícola.

4.8 Correlações

A matriz de correlação de Pearson entre os indicadores químicos do solo e a produtividade do milho na camada de 0,0–0,05 m, indicou correlação positiva para pH, CTC, SB, V, P, Ca e Mg. Por outro lado, o Al, H+Al, Mn, B e Zn apresentaram correlações negativas (Figura 6a). Para produção de biomassa do capim-maradu, observou-se correlações positivas para pH, SB e Mg e correlação negativa para Mn

(Figura 6a). A alta correlação negativa entre a produtividade do milho com o Al e H+Al, bem como a correlação negativa entre o pH e a produção de biomassa do capim indicam que a acidez do solo pode ser um dos principais fatores associados à produtividade do milho. Essas correlações indicam que os indicadores químicos do solo observados na camada superficial podem ter influenciado diretamente a disponibilidade de nutrientes, afetando assim o crescimento e a produtividade das plantas.

Na camada de 0,05–0,1 m, os indicadores químicos pH, CTC, SB e V apresentaram correlações positivas com a produtividade do milho, indicando que níveis adequados desses indicadores estão associados a um ambiente favorável para o crescimento e desenvolvimento das plantas de milho nessa profundidade do solo. Por outro lado, o Al e o H+Al apresentaram correlação negativa, sugerindo que altos níveis desses indicadores podem ter um efeito prejudicial na produtividade do milho (Figura 6b).

Na camada de 0,1–0,2 m, a produtividade do milho mostrou correlação positiva com H+Al, CTC, SB e S. Para produtividade de biomassa do capim-marandu, houve correlação positiva somente com a produtividade do milho (Figura 7a). Na camada 0,2–0,4 m, não foram observadas correlações significativas entre os indicadores de qualidade do solo e a produtividade do milho e do capim-marandu (Figura 7b). Isso sugere que, nessa profundidade do solo, os indicadores químicos analisados não estão diretamente relacionados com a produtividade das culturas estudadas, no entanto indicam que diferentes indicadores químicos do solo podem ter impactos distintos na produtividade do milho e do capim-marandu, dependendo da camada do solo analisada. Além disso, é válido ressaltar a importância de se considerar a variabilidade dos indicadores químicos do solo em diferentes profundidades para entender a relação entre o solo e a produtividade das culturas.

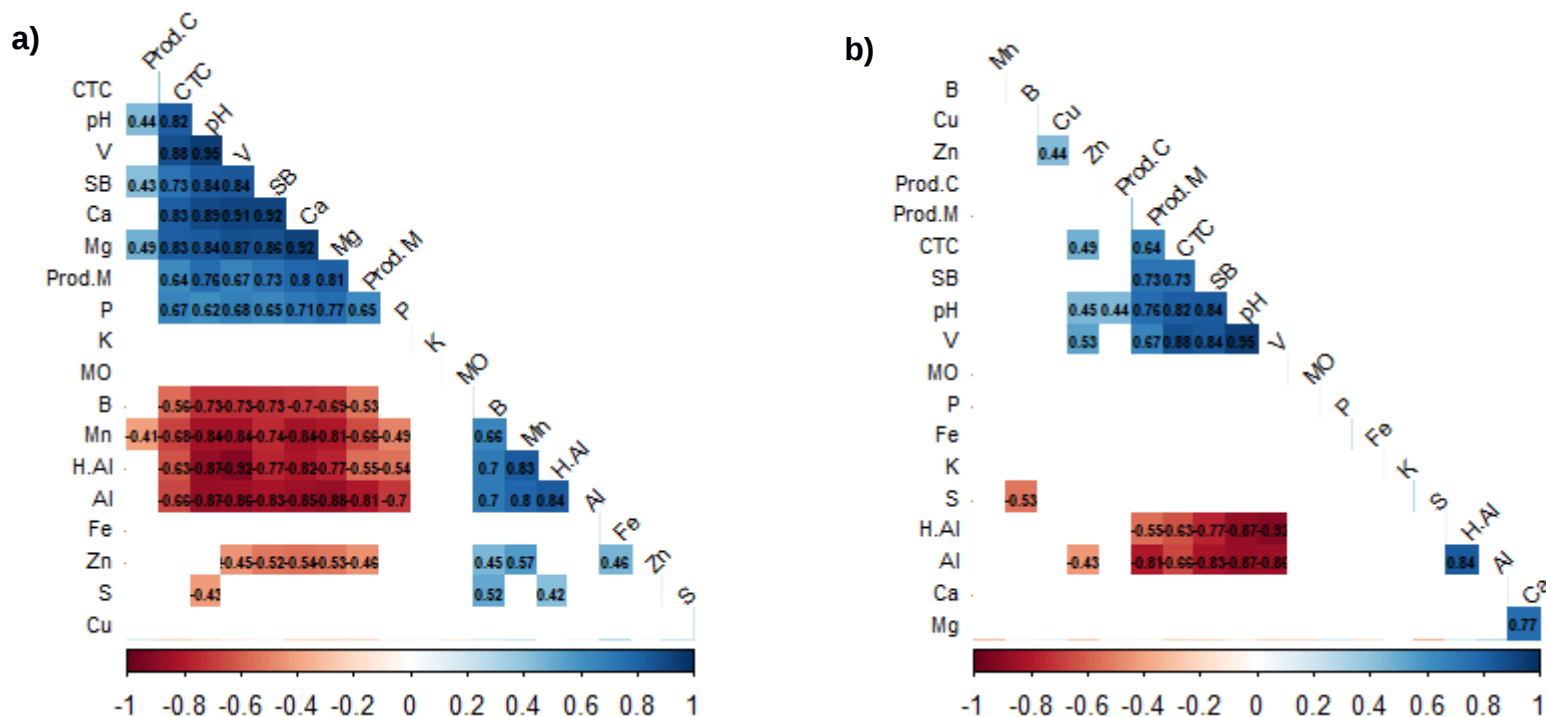


Figura 6. Análise de correlação de Pearson entre os atributos químicos do solo (MO: matéria orgânica, pH: acidez ativa, H+Al: acidez potencial, Al: alumínio trocável, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca catiônica, V: saturação de bases, m: saturação de alumínio), os teores de nutrientes do solo (P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, B: boro, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, Zn: zinco, Prod.C: produtividade capim-marandu e Prod.M: produtividade milho em resposta aos tratamentos na camada de 0,0–0,05 m (a); 0,05–0,1 m de profundidade. As letras, azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente.

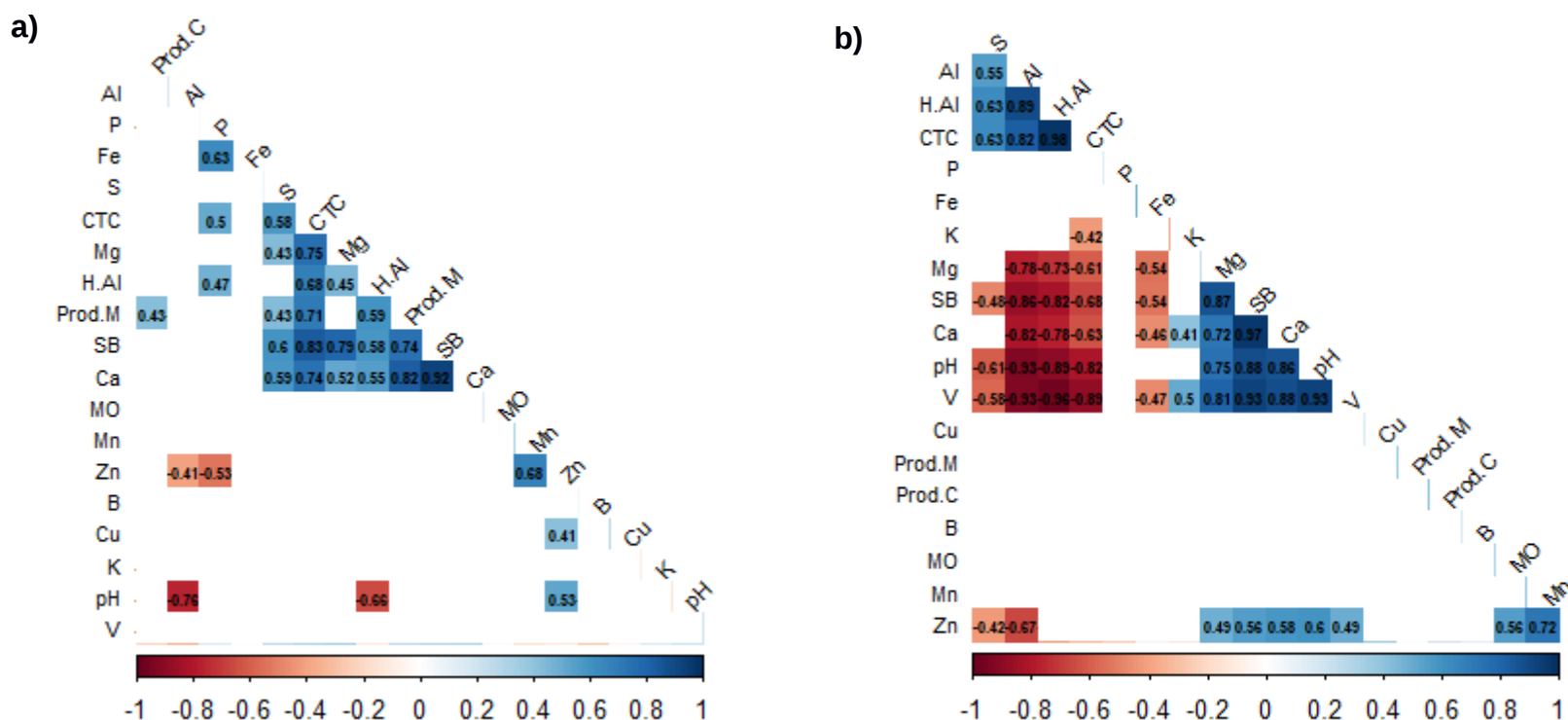


Figura 7. Análise de correlação de Pearson entre os atributos químicos do solo (MO: matéria orgânica, pH: acidez ativa, H+Al: acidez potencial, Al: alumínio trocável, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca catiônica, V: saturação de bases, m: saturação de alumínio), os teores de nutrientes do solo (P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, B: boro, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, Zn: zinco, Prod.C: produtividade capim-marandu e Prod.M: produtividade milho em resposta aos tratamentos na camada de 0,1–0,2 m (a) e 0,2–0,4 m (b) de profundidade. As letras, azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente.

A análise de correlação de Pearson entre o estado nutricional da cultura do milho, os nutrientes exportados nos grãos, os parâmetros biométricos e a produtividade do milho mostrou que os teores de K, Mg e Mn da folha diagnose correlacionaram-se positivamente com a produtividade do milho (Figura 8). Isso sugere que níveis adequados desses nutrientes na planta estão associados a um melhor desempenho e maior produtividade da cultura. O K desempenha um papel crucial no metabolismo e no transporte de nutrientes nas plantas, enquanto o Mg é um componente essencial da clorofila, influenciando a fotossíntese e a produção de energia (Johnson et al., 2022). Além disso, os teores de P, K, Ca, S, B, Cu, e Fe do grão correlacionaram-se positivamente com a produtividade do milho.

A massa de mil grãos também se correlacionou positivamente com a produtividade do milho (Figura 8). Essa associação indica que a presença adequada desses nutrientes nos grãos está relacionada a uma maior produtividade da cultura. Esses resultados enfatizam a importância de um adequado estado nutricional das plantas, especialmente em relação a nutrientes como K, Mg, Mn, P, K, Ca, S, B, Cu e Fe, para alcançar altos níveis de produtividade na cultura do milho.

A análise de Pearson revelou que a maior correlação entre a produtividade do milho e os indicadores de qualidade do solo foi encontrada entre IQS e as enzimas arilsulfatase e β -glucosidase (Figura 9). Essa correlação era esperada devido a sensibilidade da atividade dessas enzimas em relação a qualidade do solo. Outra correlação positiva, foi encontrada entre produtividade do milho e IQS. Isso indica que o IQS, como um indicador da qualidade do solo, está muito associado à produtividade tanto do milho quanto do capim-marandu. De modo geral, o IQS, foi o indicador de qualidade do solo que mais se correlacionou com a produtividade do milho e a produção de biomassa do capim.

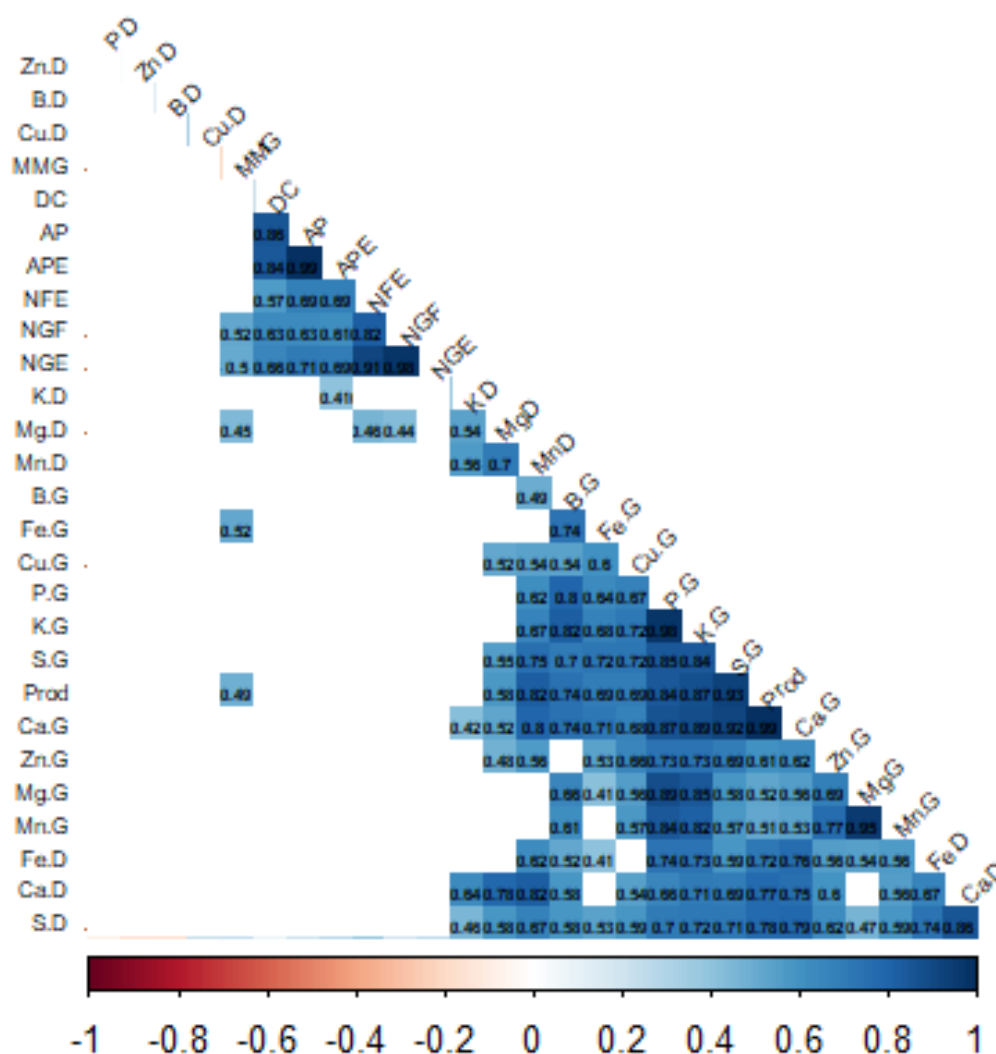


Figura 8. Análise de correlação de Pearson entre os teores foliares de macro e micronutrientes (Ca, Mg, K, P, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) na cultura do milho, a exportação de macronutrientes nos grãos do milho, Componente de produção e a produtividade de grãos de milho em função dos tratamentos. YD = Y (macro e micronutriente) + D (Diagnose), YG = Y (macro e micronutriente) + G (exportação grãos), AP= Altura planta, APE= altura primeira espiga, DC= diâmetro do colmo, NFE= número de fileira por espiga, NGF= número de grãos por fileira, NGE= número de grãos por espiga, MMG= massa de mil grãos e Prod = produtividade de grãos. A cor azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente.

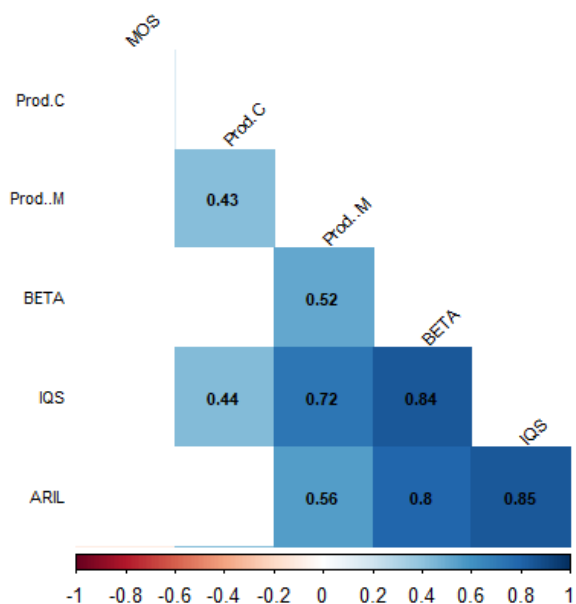


Figura 9. Análise de correlação de Pearson entre a matéria orgânica do solo, enzimas arilsulfatase e β -glucosidase, indicador de qualidade do solo, e a produtividade do milho e capim-marandu em função dos tratamentos. MOS= matéria orgânica do solo, Aril= arilsulfatase, Beta= β -glucosidase, IQS= indicador de qualidade do solo, Prod.M= produtividade do milho e Prod.C=produtividade do capim-marandu. A cor azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente.

5. CONCLUSÃO

A aplicação de doses isoladas do AS não proporcionou melhorias significativas nos indicadores físicos, químicos e biológicos do solo. Além disso, as doses de AS aplicadas não foram suficientes para incrementar o desenvolvimento, a produtividade de grãos do milho e a produtividade de biomassa do capim-marandu de forma superior ou semelhante à adubação mineral convencional.

A aplicação isolada ou combinada de doses de AS com insumos não promoveu melhorias na qualidade do solo em sistema agropastoril, indicando forte influência do manejo do solo neste sistema.

Houve correlação positiva entre os teores de macro e micronutrientes no solo e a produtividade de grãos do milho, assim como com a produtividade de biomassa do capim-marandu.

Para que se entenda com mais clareza os reais benefícios dos remineralizadores do solo, em especial do AS, é fundamental a realização de estudos a campo e de longa duração. Isso permitirá se conhecer as melhores práticas de manejo (i.e., doses, modo e época de aplicação) desses produtos. Todavia, nas condições deste estudo, estes não devem ser utilizados em substituição aos fertilizantes minerais ou aos materiais corretivos e condicionadores do solo.

REFERÊNCIAS

Alleoni LRF, Cambri MA, Caires EF (2005) Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:923–934.

Almeida GR (2016) Análises petrográficas, prospecção geofísica e geobotânica: potencialidade agroecológica da porção central do estado do Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM. **Anais...** Assis: Triunfal, p. 129–133.

Alovisi AMT, Tanques MM, Alovisi AA, Tokura LK, Silva RS, Piesanti GHL (2017) Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. **Acta Iguazu** 6(4): 69–79.

Alovisi AA, da Luz RA, Alovisi AMT, Tokura LK, Gomes CF, Cassol CJ (2020) Silicatagem no solo e na produtividade da cultura do milho. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental** 9:933–950.

Alves LA, Tiecher TL, Flores JPM, Filippi D, Gatiboni LC, Bayer C, Tiecher T (2021) Soil chemical properties and crop response to gypsum and limestone on a coarse-textured Ultisol under no-till in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma Regional** 25:e00372.

Asada FK, Pereira TO, Oliveira JAG (2018) Influência da calagem na correção da acidez do solo em cultivos agrícolas. **Revista Conexão Eletrônica** 15:50–56.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA). **Macro indicadores**. São Paulo-SP, ANDA. Disponível em: <http://www.anda.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

Azevedo AC, Dalmolin RSD (2006) **Solos e ambiente**: uma introdução. 2.ed. Santa Maria: Pallotti, p. 100.

Balbino LC, Cordeiro LAM, Porfírio-da-Silva V, Moraes AD, Martínez GB, Alvarenga RC, Galerani PR (2011) Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46:1–12.

Bamberg AL, Martinazzo R, Silveira CAP, Pillon CN, Stumpf L, Bergmann M, de Souza Martins E (2023) Soil Fertilization and Corn-Wheat Grain Production with Alternative Nutrient Sources. **Research Square**, 1:1-27. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2406512/v1

Barbosa JC, Maldonado Júnior W (2015) **AgroEstat** - Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos. Versão 1.1.0.711. Jaboticabal: Unesp.

Barrón V, Méndez JM, Balbuena J, Cruz-Yusta M, Sánchez L, Giménez C, Sacristán D, Gonzáles-Guzmán A, Rodríguez ARS, Skiba UM, Inda AV, Marques Junior J, Recio JM, Delgado A, Campillo MC Del, Torrent J (2020) Photochemical emission and fixation of NO_x gases in soils. **Science of Total Environment** 702:134982.

Bermeo JPC, Hincapié KLP, Cherubin MR, Morea FAO, Olaya AMS (2022) Evaluating soil quality in silvopastoral systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in the Colombian Amazon. **Revista Ciência Agronômica**, 53:e20217966.

Bonetti JA, Anghinoni I, Gubiani PI, Cecagno D, Moraes MT (2019) Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil & Tillage Research** 186:280–291. DOI: 10.1016/j.catena.2016.04.023

Borges WLB, Calonego JC, Rosolem CA (2019) Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems** 93:2111–2119. Doi:10.1007/s10457-018-0329-0t.

Borges WLB, Sarto MVM, de Souza IMD, Juliano PHG (2021) Soil quality in sustainable agricultural production systems. **Agricultural Research Updates** 143–191.

Borges WLB, Juliano PHG, Souza IMD, Rodrigues LNF, Hipólito JL, Andreotti M (2022a) New Methodologies for the Surface Application of Limestone and Gypsum in Different Crop Systems. **Sustainability** 14:8926.

Borges WLB, Hipólito JL, Juliano PHG, de Souza IMD, de Freitas RS, Andreotti M (2022b) Surface Application of Hydrated Lime in Different Crop Systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 1–29.

Brasil (2022) **Lançado o Plano Nacional de Fertilizantes**. Brasília, DF: Ministério da Economia. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/principais-acoes-na-area-economica/acoes-2022/lancado-o-plano-nacional-de-fertilizantes-202220132050>. Acesso em: 04 jun. 2023.

Brasil (2016) Instrução Normativa nº 5, DE 10 de março de 2016. ed. 49. p. 10. Disponível em <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=317444#:~:text=Ficam%20estabelecidas%20as%20regras%20sobre,para%20plantas%2C%20destinados%20%C3%A0%20agricultura.>

Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, de Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mader P, Pulleman M, Sukell W, Van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil quality—A critical review. **Soil Biology and Biochemistry** 120:105–125.

Caires EF, Joris HAW, Churka S (2011) Long-term effects of lime and gypsum additions on no till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management** 27:45–53.

Caires, EF (2012) Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto** 39.

Cantarella H, Quaggio JA, Mattos JRD, Boaretto RM, Raij Van B (2022) **Boletim 100**: recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico, 489p.

Carvalho GDO, Rodrigues NF, Tavares SDL, Donagemma GK, Clemente EDP (2021) Efeito de fertilizantes à base de escórias de siderurgia sobre a tolerância do Capim Braquiária submetida a estresse hídrico. In Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO **Anais...** Porto Alegre: UFGRS, p. 326–330.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA NO BRASIL (CNA) 2022 **Pib do agronegócio brasileiro**. Cidade Piracicaba-SP: CNA. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>, p3. Acesso em: 01 jun. 2023.

Comin JJ, Ambrosini VG, Rosa DJ, Basso A, Loss A, De Melo GWB, Lovato PE, Lourenzi CR, Ricachenevsky FKG (2018) Brunetto Liming as a means of reducing copper toxicity in black oats. **Ciencia Rural** 48:4. Doi: 10.1590/0103-8478cr20170278.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) (2020/2021) **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF: CONAB. v. 8, safra 2020/21, n. 7, 9º Levantamento, 121 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) (2021/2022). **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF: CONAB. v. 9, safra 2021/22, n. 12, 12º Levantamento, 88p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 01 jun. 2023

Costa NR, Andreotti M, Lopes KSM, Yokobatake KL, Ferreira JP, Pariz CM, Bonini CSB, Longhini VZ (2015) Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:852–863.

Crusciol CA, Artigiani AC, Arf O, Carmeis Filho AC, Soratto RP, Nascente AS, Alvarez RC (2016) Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena** 137:87–99.

Dalmora AC, Ramos CG, Oliveira MLS, Oliveira LFS, Schneider IAH, Kautzmann RM (2020) Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: Evidence of sustainability. **Journal of Cleaner Production** 256:120432.

Dane JH, Topp GC (2002) **Methods of Soil Analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1692p. part 4. (Physical Methods, 5).

Danielson RE, Eutherland PL, Porosity (1986) Methods of soil analysis. In: Klute A (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical methods. Madison: Soil Science Society of America, 1986. part 1, p. 443–461.

Dettmer C, Abreu UGP, Guilherme DDO, Ferrari Neto J, Dettmer T (2020) Uso de pó de rocha em sistemas de produção agrícola: breve análise sobre viabilidade técnica. In Embrapa Pantanal-Artigo em anais de congresso. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO. **Anais...** Naviraí:UFMS p. 1– 6.

Duarte AP, Cantarella H, Quaggio JA (2022) Milho. In: Cantarella H, Quaggio JA, Mattos Jr. D, Boaretto MR, Rajj Van B. **Boletim 100**: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, p.199–208.

EMPRESA BRASILEIRA DE PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (EMBRAPA) (2020) **Tecnologia BioAS**: tecnologia de bioanálise de solo Embrapa como a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. Planaltina, DF: Embrapa Cerrado, p. 6.

Evangelista SJ, Field DJ, McBratney AB, Minasny B, Ng W, Padarian J, Wadoux AMC (2023) A proposal for the assessment of soil security: Soil functions, soil services and threats to soil. **Soil Security** 10:100086.

Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, Smaoui A, Abdelly C, Rabhi M (2016) Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. **Acta Physiologiae Plantarum** 38:145.

Ferreira GW, Lourenzi CR, Comin JJ, Loss A, Girotto E, Ludwig MP, Freiberg JA, Oliveria CD, Marchezan C, Palermo NM, Scopel G, Santos Thoma AL, Charopem AB, Moura-Bueno JM, Drescher GL, Brunetto G (2023) Effect of organic and mineral fertilizers applications in pasture and no-tillage system on crop yield, fractions and contaminant potential of Cu and Zn. **Soil and Tillage Research** 225:105523.

Fonseca ED, Ponzoni FJ, Formaggio AR (2007) Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da disponibilidade de forragem no bioma “campos sulinos”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 15:241–249.

Food and Agriculture Organization (FAO) (2021) **The State of Food Security and Nutrition in the World 2021**: transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All. Roma: FAO, Xp.

Galdos MV, Pires LF, Cooper HV, Calonego JC, Rosolem CA, Mooney SJ (2019) Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma** 337:1126–1135.

Giarola NFB, Tormenta CA, Silva, AP, Ball B (2009) Método de avaliação visual da qualidade da estrutura aplicado a Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural** 39:2531–2534.

Gotz LF, Castamann A, Piovesan F, Anzolin BL, Herek TA, Mikoanski WM, Rita YL (2019) Use of rock powder associated with bovine manure in Latossolo Vermelho cultivated with wheat. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável** 9:131–139.

Haruna SI, Anderson SH (2020) No-Till Farming Systems for Enhancing Soil Water Storage. In No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture. **Springer Cham**, 213–231.

Hasnain M, Munir N, Abideen Z, Zulfiqar F, Koyro HW, El-Naggar A, Yong JWH (2023) Biochar-plant interaction and detoxification strategies under abiotic stresses for achieving agricultural resilience: a critical review. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 249:114408.

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

Hellegers P (2022) Food security vulnerability due to trade dependencies on Russia and Ukraine. **Food Security** 14:1503–1510.

Instituto Brasileiro Geográfico Estatístico (IBGE) (2023) **Produto interno bruto – (PIB) 2022.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=pib%20agricultura&se>. Acessado em: 11 mar 2023.

Johnson R, Vishwakarma K, Hossen MS, Kumar V, Shackira AM, Puthur JT, Sarraf GAM, Hasanuzzaman M (2022) Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, 172:56–69.

Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE (1997) Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal** 61:4–10.

Kumar A, Patel JS, Meena VS, Srivastava R (2019) Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 20:101271.

Lin F, Li X, Jia N, Feng F, Huang H, Huang J, Fan S, Ciais P, Song XP (2023) The impact of Russia-Ukraine conflict on global food security. **Global Food Security** 36:100661.

Lombardi Neto F, Drugowich M (1994) **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água.** Campinas: CATI, p. 168.

Loss A, Pereira MG, Giácomo SG, Perin A, Anjos LHC (2011) Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46:1269–1276.

Luz LB, Lápido-Loureiro FE, Sampaio JA, Castilhos ZC, Bezerra MS (2010) Rochas, minerais e rotas tecnológicas para produção de fertilizantes alternativos. In: Luz AB, Castilhos ZC. *Agrominerais para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. p. 61–88.

Maia LC, Silva LMP, Lima JSS, Sousa MM, Cavalcante IHL, & Fernandes-Júnior PI (2020) Aplicação de basalto em pó na exportação de nutrientes do grão de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 24:800–804.

Malavolta E (2006) Manual de nutrição mineral de plantas. Piracicaba: Agronômica Ceres, p. 631

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, p. 319.

Marchão RL; Balbino LC, Silva EM, Santos Junior JDG, Sá MAC, Vilela L, Becquer T (2007). Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesq Agropec Bras**. 42:873–882.

Marschner H (1995). Efeitos do pH da rizosfera na nutrição de fósforo. Manipulação genética de plantas cultivadas para melhorar o manejo integrado de nutrientes em sistemas de cultivo, 1:107–115.

Martins ES, Oliveira CG, Resende AV, Matos MSF (2008) Agrominerais - rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: Luz AB, Lins FAF. *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM, p. 205–221.

Martins ES, Silveira CAP, Bamberg AL, Martinazzo R, Bergmann M, Angélica RS (2014) Silicate agrominerals as nutrient sources and as soil conditioners for tropical agriculture. In: *WORLD FERTILIZER CONGRESS*, 16:138.

Melamed R, Gaspar JC, Miekelele N (2009) Pó-de-rocha como fertilizantes alternativos para sistemas de produção sustentável em solos tropicais. In: Loureiro FEL, Melamed R, Figueiredo Neto, J. *Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 385–395.

Melo VF, UChôa SCP, Dias FDO, & Barbosa GF (2012) Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, 42:471–476.

Mendes IC, Marchão RL, Junior FBR, Chaer GM, Salton JC, Vilela L, & Benites V M (2022) Saúde do solo em sistemas de integração lavoura pecuária. In: Martins AG, Batista AH, Wendling B, Pereira MG, Santos WO (ed.). *Manejo do solo em sistemas integrados de produção*. Ponta Grossa: **Atena**, pp. 189 – 223.

Mendes IC, Sousa DMG, Dantas OD, Lopes AADC, Reis Jr FBD, Oliveira MI, Chaer GM (2021) Soil quality and grain yield: A win-win combination in clayey tropical Oxisols. **Geoderma** 1–10.

Mendes IC, Sousa DMG, Reis junior FB dos, Alves ACL de (2018). Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. **BOLETIM INFORMATIVO** (Sociedade Brasileira de Ciência do solo), 44: 20–25.

Mendes IDC, Borin ALDC, de Oliveira MIL, dos Reis Júnior FB, & Chaer GM (2019) Diagnóstico da saúde do solo nas áreas de produção de algodão no Estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 12. Goiânia, GO. Anais. Goiânia: Abrapa, 2019.

Miguel PSB, Gomes FT, Rocha WSD, Martins CE, Carvalho CA, Oliveira AV (2010) Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista**, 24:13–29.

Nascimento CO (2014) **Avaliação de revestimentos de polímeros biodegradáveis em grânulos de KCl obtidos por meio de leito fluidizado**. 77 f. Dissertação (Mestrado – Curso de Engenharia Industrial), Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Nascimento M, & Loureiro FEL (2004) Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 66 p. (Série Estudos e Documentos, 61).

Nicolodi, M., Anghinoni, I., Gianello, C., 2008. Relações entre os tipos e indicadores de acidez do solo em lavouras no sistema plantio direto na região do Planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1217-1226

Niero LAC, Dechen SCF, Coelho RM, Maria ICD (2010) Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um latossolo vermelho distroférrico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1271–1282.

Ogino CM, Costa G, Popova ND, Martines JG (2021) Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 59: e220367.

ONU. State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Sustainable Development. Available from: <https://news.un.org/pt/story/2022/07/1794722>

Ozório JMB, Rosset JS, Schiavo JA, Panachuki ES, Souza CBS, Menezes R, Marra IM (2019) Estoque de carbono e agregação do solo sob fragmentos florestais nos biomas Mata Atlântica e Cerrado. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, 53:97–116.

Pires CB, Amado T, Reimche G, Schwalbert R, Sarto MVM, Nicoloso RS, Fiorin JE, Rice CW (2020) Diversified crop rotation with no-till changes microbial distribution with depth and enhances activity in a subtropical Oxisol. **European Journal of Soil Science**, 71:1–15.

Pontes LDS, Tullio GF, Martins ADS, Moletta JL, & Porfírio-da-Silva V (2018). Corn yield for silage and grains in different integrated crop-livestock systems. **Revista Ciência Agronômica**, 49:315–323.

Portugal JR (2015) **Coberturas vegetais e doses de nitrogênio, associadas à inoculação com *Azospirillum* brasilense, no cultivo do milho na região de Cerrado**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Faculdade de Engenharia - Unesp – Câmpus de Ilha Solteira, Ilha Solteira.

R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acessado em: 26 de jun 2021.

Raij B van (2001) Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. International Plant Nutrition Institute, 2011. Raij B van, Andrade JC, Cantarella H, Guaggio JA Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. 1.ed. Campinas: Instituto Agronômico, p 285.

Raij B. van, Andrade JC, Cantarella H, Guaggio JA (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. 1.ed. Campinas: Instituto Agronômico, p. 285.

Raij, B. van, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (1997) Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, p. 285.

Ramos CG, Dalmora AC, Kautzmann RM, Hower J, Dotto GL, & Oliveira LFS (2021) Sustainable release of macronutrients to black oat and maize crops from organically-altered dacite rock powder. **Natural Resources Research**, 30:1941–1953.

Ramos CG, dos Santos de Medeiros D, Gomez L, Oliveira LFS, Schneider IAH, & Kautzmann RM (2020) Evaluation of soil re-mineralizer from by-product of volcanic rock mining: experimental proof using black oats and maize crops. **Natural Resources Research**, 29:1583–1600.

Rodrigues M, Cezar E, Dos Santos GLAA, Reis AS, Furlanetto RH, De Oliveira RB, & Nanni MR (2022) Estimating technological parameters and stem productivity of sugarcane treated with rock powder using a proximal spectroradiometer Vis-NIR-SWIR. **Industrial Crops and Products**, 186, 115278.

Rosolem CA, Foloni JSS, e Oliveira RH (2003) Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 38:301–309.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbrreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa.

Santos JVD, De Presbiteris RJ, Dos Santos VC, Grassi MT, Messerschmidt I, Pereira BF, & Abate G (2017) Avaliação da liberação de elementos traço em solos tratados com xisto retornado. **Química Nova**, 40, 496–505.

Santos JV, Bento LR, Bresolin JD, Mitsuyuki MC, Oliveira PPA, Pezzopane JRM, Bernandi AC de C, Martin-Neto L (2022) The long-term effects of intensive grazing and silvopastoral systems on soil physicochemical properties, enzymatic activity, and microbial biomass. **Catena**, 219:106619.

Sarto MV, Borges WLB, Sarto JR, Rice CW, Rosolem CA (2020a) Root and shoot interactions in a tropical integrated crop-livestock-forest system. **Agricultural systems**, 181:1–11.

Sarto MV, Borges WLB, Sarto JRW, Pires CAB, Rice CW, Rosolem CA, (2020b) Soil microbial community and activity in a tropical integrated croplivestock system, **Applied Soil Ecology**, 145:1–11.

Seidel EP, Mattia V, Mattei E, Corbari F (2015) Produção de Matéria Seca e Propriedades Físicas do Solo na Consorciação Milho e Braquiária. **Scientia Agraria Paranaensis**, 14:18–24.

Silva DW, Canepelle E, Lanza Nova ME, Guerra D, Redin M (2020) Pó de basalto como fertilizante alternativo na cultura do feijão preto em Latossolo Vermelho. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 15:373–378.

Silva GF, Calonego JC, Luperini BCO, Chamma L, Alves ER, Rodrigues SA, & Almeida SM (2022) Soil—Plant Relationships in Soybean Cultivated under Conventional Tillage and Long-Term No-Tillage. **Agronomy**, 12: 697.

Silva LS, Santos Laroca JV, Coelho AP, Gonçalves EC, Gomes RP, Pacheco LP, & Pure IG (2022) Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? **Applied Soil Ecology**, 170:104257.

Silva RFD, Aquino AMD, Mercante FM, & Guimarães MDF (2006). Macrofauna invertebrada do solo sob diferentes sistemas de produção em Latossolo da Região do Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 41:697–704.

Serrano Junior OV (2021) **Qualidade física do solo, estoque de carbono e produtividade de diferentes sistemas silvipastoris regenerativos**. 167 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas.

Signor Diana, Diosnisio JA (2016) Macrofauna. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE).

Silva BEC, Medina EM, & Jolomba MR (2017) Propriedades físicas do solo em função de diferentes gerenciamentos de pastagem. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, 7:66–75. <https://doi.org/10.21206/rbas.v7i3.418>

Silva DJ (1990) Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos. 2a ed. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 165.

Silva RC, Cury ME, Ieda JJC, Sermarini RA, & Azevedo ACD (2017) Chemical attributes of a remineralized Oxisol. **Ci. Rural**, 47:11, e20160982-e20160982.

Silva WJ, (2021) O PRODUTO INTERNO BRUTO DE 2019: análise de suas variáveis e desempenho na economia brasileira. Caderno de Pesquisa Aplicada, Recuperado de <http://isca.edu.br/revista/index.php/cpesqaplic/article/view/48>, 1:28–44.

Silva GF, Calonego JC, Luperini BCO, Chamma L, Alves ER, Rodrigues SA, & de Almeida, Silva M (2022) Soil—Plant Relationships in Soybean Cultivated under Conventional Tillage and Long-Term No-Tillage. **Agronomy**, 12: 697.

Silva RC, Cury ME, Ieda JJC, Sermarini, R.A., & Azevedo, A.C.D., 2017. Chemical attributes of a remineralized Oxisol. *Ci. Rural*, 47:11, e20160982-e20160982.

Silva WJ da (2021) O PRODUTO INTERNO BRUTO DE 2019: análise de suas variáveis e desempenho na economia brasileira. Caderno de Pesquisa Aplicada, Recuperado de <http://isca.edu.br/revista/index.php/cpesqaplic/article/view/48>, 1:28–44.

Silveira RTG (2016) **Uso de rochagem pela mistura de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizante natural de solos tropicais lixiviados**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília.

Skorupa LA, Manzatto CV (2019). Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos ambientais. Embrapa Meio Ambiente-Livro Científico (ALICE), p. 471.

Soares MDR, Campos MCC, Oliveira IA, Cunha JM, Santos LAC, Fonseca JS, & Souza ZM (2016) Atributos físicos de uso individual em áreas sob diferentes sistemas na região de Manicoré. **SOU. Revista De Ciências Agrárias**, 59:9–15. <https://doi.org/10.4322/rca.2020>

Souza WF, Costa KAP, Guarnieri A, Severiano EC, Silva JT, Teixeira DAA, Oliveira S S, Dias MBC (2019) Production and quality of the silage of corn intercropped with Paiaguas palisadegrass in different forage systems and maturity stages. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 48:1–16.

Tabatabai MA (1994) Soil Enzymes. In “Methods of Soil Analysis – Part 2 Microbiological and Biochemical Properties” (R. W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bezdicek, S. Smith, M.A. Tabatabai, A. Wollum, eds.), pp. 786–944. SSSA, Madison, WI.

Teixeira WWR (2017) **Absorção, particionamento e remoção de nutrientes pela soja em áreas de alta produtividade no Brasil**. 86 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

Theodoro SMDCH, Tchouankoue JP, Gonçalves AO, Leonardos OH, Harper JA (2012) importância de uma rede tecnológica de rochagem para a sustentabilidade em países tropicais. **Revista Brasileira de Geografia e Física**, 6:1390–1407.

Thor K (2019) Calcium—nutrient and messenger. *Frontiers in plant science*, 10, 440.

Toyota A, Kaneko N, Ito MT (2006) Soil ecosystem engineering by the train millipede *Parafontaria laminata* in a Japanese larch forest. **Soil Biology and Biochemistry**, 38:1840–1850.

Vicensi M, Lopes C, Koszalka V, Umburanas RC, Vidigal JCB, de Ávila FW, & Müller MML (2020). Soil fertility, root and aboveground growth of black oat under gypsum and urea rates in no till. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20: 1271–1286.

Vieira Filho JER, Gasques JG (2016) Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade. Brasília: Ipea, p. 391.

Vivela L, Martha Jr GB, Macedo MCM, Marchão RL, Guimarães Jr R, Pulrolink Maciel GA (2011) Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46:1127–1138.

Wang H, Tang S, Zhi H, Xing L, Zhang H, Tang C, & Diao X (2022) The boron transporter SiBOR1 functions in cell wall integrity, cellular homeostasis, and panicle development in foxtail millet. **The Crop Journal**, 10: 342–353.

ANEXOS



Anexos: Aplicação de agromineral silicático (a), semeadura do milho (b), coleta de amostras para análise física (c), coleta de amostras para análise química e biológica (d), análises laboratoriais (e, f), colheita do milho (g) e coleta da biomassa do capim-marandu (h).