

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Matheus Haruichi Okazuka

**ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR: Novas perspectivas
com a utilização de fertilizante organomineral**

Dracena

2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Matheus Haruichi Okazuka

**ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR: Novas perspectivas
com a utilização de fertilizante organomineral**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas
- FCAT– Unesp, Câmpus de Dracena, como
parte das exigências para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Reges Heinrichs

Dracena

2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR: Novas perspectivas com a utilização de fertilizante organomineral

Modalidade: Trabalho de **Atividades de pesquisa**

Autor: Matheus Haruichi Okazuka

Orientador (a): Prof. Dr. Reges Heinrichs

Co-orientador(es):

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 22/05/2026

Reges Heinrichs

Lucas Aparecido Manzani

Lisboa

Karina Shizue Soares Kai

Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas – CCG-EA

Rod. Cmte. João Ribeiro de Barros, km 651- Bairro das Antas – CEP: 17900-000 – Dracena/SP - Brasil
Tel. (18) 3821-8200 – www.dracena.unesp.br – ccgea.dracena@unesp.br

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e às minhas irmãs, por acreditarem nos meus sonhos e me apoiarem em todos os momentos possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria ao longo desta caminhada, guiando meus passos nos momentos de dificuldade e permitindo que eu chegasse até aqui.

À minha família, meu mais profundo agradecimento pelo amor, apoio, incentivo e compreensão durante todos os anos da graduação. Vocês foram minha base em cada etapa, sempre acreditando em mim e me dando forças para continuar, mesmo nos momentos mais difíceis.

À FCAT/UNESP – Dracena, expresso meu reconhecimento a todo o corpo docente, técnico e administrativo pela formação acadêmica, pelo acolhimento e pelas oportunidades proporcionadas ao longo da graduação.

Ao Prof. Dr. Reges Heinrichs, agradeço pela orientação dedicada, pelos ensinamentos, pela confiança e por sempre me incentivar a buscar crescimento acadêmico, profissional e científico. Sua orientação foi fundamental para minha formação e para a realização deste trabalho.

À banca examinadora, agradeço por aceitarem o convite para contribuir com correções, sugestões e avaliações importantes para o aprimoramento deste trabalho: Dr. Reges Heinrichs, Dr. Lucas Aparecido Manzani Lisboa, Mestranda Karina Shizue Soares Kai e, como suplente, Dr. Maurício Bruno Prado da Silva.

Aos colegas e amigos do grupo de estudo GENAP (Grupo de Experimentação em Nutrição e Adubação de Plantas) agradeço pela parceria, pelos aprendizados compartilhados, pela ajuda nas atividades de campo, laboratório e análise dos dados, e por todos os momentos de convivência que contribuíram para minha formação.

Aos amigos que estiveram ao meu lado durante toda a graduação, deixo minha sincera gratidão pela amizade, companheirismo, conversas, risadas e apoio nos momentos bons e difíceis. Cada um contribuiu de alguma forma para que essa trajetória fosse mais leve e especial.

À república, agradeço por ter sido uma segunda casa durante esse período. Pelas histórias vividas, pela amizade, pela convivência diária, pelos desafios compartilhados e pelos momentos que ficarão guardados na memória.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta conquista. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada contribuição ao

longo dessa caminhada foram essenciais para a realização deste trabalho e para o encerramento de mais uma etapa importante da minha vida.

“A nossa maior glória não está em nunca cair, mas em levantar-se sempre depois de cada queda.” (*Confúcio*)

RESUMO

A cana-de-açúcar possui elevada importância econômica para o Brasil, porém a manutenção da produtividade em áreas de soqueira depende do manejo adequado da fertilidade do solo. Nesse contexto, os fertilizantes organominerais surgem como alternativa complementar à adubação mineral convencional, por associarem nutrientes minerais e matriz orgânica. O objetivo deste trabalho foi avaliar doses de fertilizante organomineral à base de cama de frango na adubação da 1ª e da 2ª socas de cana-de-açúcar, sobre a produtividade, qualidade tecnológica, estado nutricional das plantas e atributos químicos e enzimáticos do solo. O experimento foi conduzido em área comercial, em Adamantina, SP, em delineamento de blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições: controle sem adubação, adubação mineral convencional e doses de 125%, 100%, 75% e 50% da recomendação via organomineral. Foram avaliados produtividade de colmos, perfilhamento, índice SPAD, densidade radicular, teores foliares de macronutrientes, atributos do solo e qualidade tecnológica da matéria-prima. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Duncan a 5%. A produtividade de colmos não diferiu entre os tratamentos na 1ª soca; entretanto, na 2ª soca, a dose de 75% do organomineral destacou-se em relação ao controle sem adubação. As demais variáveis apresentaram respostas dependentes do ciclo e sem comportamento linear em função das doses. Conclui-se que o fertilizante organomineral apresenta potencial para uso na adubação de soqueira da cana-de-açúcar, especialmente na dose de 75% da recomendação, mantendo desempenho produtivo competitivo em relação à adubação mineral convencional.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Adubação. Fertilizante organomineral. Fertilidade do solo. *Saccharum spp.*

ABSTRACT

Sugarcane has high economic importance for Brazil; however, maintaining productivity in ratoon areas depends on proper soil fertility management. In this context, organomineral fertilizers emerge as a complementary alternative to conventional mineral fertilization, as they combine mineral nutrients with an organic matrix. The objective of this study was to evaluate doses of poultry-litter-based organomineral fertilizer applied to the 1st and 2nd sugarcane ratoons, assessing stalk yield, technological quality, plant nutritional status, and soil chemical and enzymatic attributes. The experiment was conducted in a commercial field in Adamantina, São Paulo, Brazil, using a randomized block design with six treatments and four replications: unfertilized control, conventional mineral fertilization, and organomineral fertilizer at 125%, 100%, 75%, and 50% of the recommended rate. Stalk yield, tillering, SPAD index, root density, leaf macronutrient contents, soil attributes, and technological quality of the raw material were evaluated. Data were subjected to analysis of variance, and means were compared by Duncan's test at 5% probability. Stalk yield did not differ among treatments in the 1st ratoon; however, in the 2nd ratoon, the 75% organomineral rate stood out compared with the unfertilized control. The other variables showed cycle-dependent responses and no linear behavior as a function of fertilizer rates. It is concluded that organomineral fertilizer has potential for use in sugarcane ratoon fertilization, especially at 75% of the recommended rate, maintaining competitive productive performance compared with conventional mineral fertilization.

Keywords: Sugarcane. Fertilization. Organomineral fertilizer. Soil fertility. *Saccharum spp.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condições meteorológicas durante a realização da pesquisa. Ano agrícola 2023/2024 e 2024/2025, Adamantina, SP.	23
Figura 2 - Esquema ilustrativo da leitura do índice SPAD, coleta da folha diagnóstica +1 e preparo da amostra foliar para determinação dos teores de macronutrientes em cana-de-açúcar	25
Figura 3 - Modelo de coleta e preparo das amostras da densidade de raízes. .	30
Figura 4 - Produtividade de colmos em função das doses aplicadas de adubo organomineral e mineral na soqueira da cana-de-açúcar. Ano agrícola 2023/24 e 2024/25. Adamantina, SP.....	33
Figura 5 - Pontas secas devido ao estresse hídrico esquerda foto à esquerda, novembro de 2023; à direita, março de 2024	37
Figura 6 - Matriz de correlação de Pearson: produtividade, atributos tecnológicos, estado nutricional foliar, atividade enzimática e atributos químicos do solo em cana-de-açúcar sob doses de fertilizante organomineral na 1ª soca (A) e na 2ª soca (B)	48
Figura 7 - Efeito da geada durante o 2 ano experimental, podridão da gema lateral e isoporização causada pela morte apical.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores dos atributos químicos do solo durante instalação do projeto adubado com dose de fertilizante organomineral e mineral no ano agrícola 2023/24. Adamantina, SP.....	23
Tabela 2 - Doses de fertilizante organomineral e adubação mineral aplicadas na cana-de-açúcar, cultivar RB975201, durante a 1ª e a 2ª socas, em Adamantina, SP.....	24
Tabela 3 - Perfilhamento de colmos de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	33
Tabela 4 - SPAD e Raiz 0-20 cm da cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	35
Tabela 5 - N e P foliar de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	38
Tabela 6 - K e Ca foliar de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	39
Tabela 7 - Mg e S foliar de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	40
Tabela 8 - pH e H+Al no solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	41
Tabela 9 - MO e P (resina) do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	42
Tabela 10 - K e S do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	43

Tabela 11 - Ca e Mg do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	44
Tabela 12 - B-glicosidase e Arilsulfatase do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	45
Tabela 13 - P-remanescente no solo da cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	47
Tabela 14 - ATR kg t e t ha em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	50
Tabela 15 - AR e POL em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	50
Tabela 16 - Fibra e Brix em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Aspectos gerais sobre a cana-de-açúcar	16
3.2 Fertilizantes mineral e organomineral	17
3.3 Benefícios do fertilizante Organomineral	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1 Localização	22
4.2 Clima	22
4.3 Solo	23
4.4 Delineamento experimental	24
4.5 Avaliações	25
4.5.1 Estado nutricional das plantas e teor de clorofila pelo índice SPAD	25
4.5.2 Perfilhamento e número de colmos	26
4.5.3 Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar	26
4.5.4 Atributos físicos, químicos e enzimáticos do solo	28
4.5.5 Produção de colmos	29
4.5.6 Densidade de raízes	29
4.5.7 Análise estatística	30
5 RESULTADOS e DISCUSSÃO	32
5.1 Produtividade e perfilhamento	32
5.2 Índice SPAD e densidade de radicular a 0 – 0,20 m	34

5.3 Teores de nutrientes	36
5.4 Atributos químicos e biológicos do solo	40
5.5 Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar	49
6 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, com elevada importância econômica para a produção de açúcar, etanol e bioenergia. Entretanto, a manutenção da produtividade, especialmente em áreas de soqueira, depende do manejo adequado da fertilidade do solo e da eficiência da adubação, uma vez que a cultura apresenta alta exigência nutricional ao longo do ciclo.

O Brasil está entre os maiores consumidores mundiais de fertilizantes e apresenta elevada dependência de importações, o que aumenta os custos de produção e a vulnerabilidade do setor agrícola às oscilações do mercado internacional (Brasil, 2022). Nesse contexto, torna-se necessário buscar estratégias que aumentem a eficiência de uso dos nutrientes e reduzam a dependência exclusiva de fertilizantes minerais.

Os fertilizantes organominerais surgem como alternativa promissora por associarem fontes minerais a matrizes orgânicas, favorecendo a liberação gradual de nutrientes, a reciclagem de resíduos e possíveis melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Bouhia *et al.*, 2022; Uddin *et al.*, 2025). Entre as matrizes orgânicas, a cama de frango destaca-se por conter nutrientes essenciais e matéria orgânica, podendo atuar como fonte complementar à adubação mineral.

Em cana-de-açúcar, estudos indicam que fertilizantes organominerais podem apresentar desempenho semelhante ou superior ao fertilizante mineral, dependendo da fonte orgânica, da dose aplicada, do solo e do ciclo da cultura (Ramos, 2013; Crusciol *et al.*, 2020; Gonçalves *et al.*, 2021). Além disso, a fração orgânica desses fertilizantes pode conter compostos associados à matéria orgânica humificada, os quais podem influenciar a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular, embora esses efeitos dependam da composição do material e das condições de cultivo (Canellas; Olivares, 2014; Shah *et al.*, 2018).

Dessa forma, a hipótese deste trabalho é que a aplicação de doses de fertilizante organomineral à base de cama de frango na soqueira de cana-de-açúcar apresente desempenho agrônômico semelhante ou superior à adubação mineral convencional, mantendo ou incrementando a produtividade, a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar e os atributos químicos e enzimáticos do solo na 1ª e 2ª soca.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de doses de fertilizante organomineral à base de cama de frango na adubação da 1ª e da 2ª socas de cana-de-açúcar, em comparação à adubação mineral convencional, sobre a produtividade de colmos, a qualidade tecnológica da matéria-prima, o estado nutricional das plantas e os atributos químicos e enzimáticos do solo.

2.2 Objetivos Específicos

- Comparar os efeitos da adubação organomineral, em diferentes doses, com a adubação mineral convencional na produtividade de colmos da cana-de-açúcar em 1ª e 2ª socas.
- Avaliar o efeito dos tratamentos sobre o crescimento vegetativo da cultura, por meio do perfilhamento, índice SPAD e densidade radicular.
- Determinar os teores foliares de macronutrientes em função das doses de fertilizante organomineral e da adubação mineral convencional.
- Verificar as alterações promovidas pelos tratamentos nos atributos químicos do solo.
- Avaliar a atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase como indicadores da resposta biológica do solo ao manejo adotado.
- Avaliar os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, incluindo ATR, Pol, Brix, fibra e açúcares redutores.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais sobre a cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das culturas agrícolas de maior relevância econômica para o Brasil, devido à sua participação na produção de açúcar, etanol, bioeletricidade e outros coprodutos do setor sucroenergético. No cenário internacional, o país destaca-se como o maior produtor mundial da cultura e importante fornecedor de açúcar e etanol, condição que deve se manter na próxima década, conforme projeções da OECD-FAO (OECD; FAO, 2025). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, a safra brasileira 2025/26 foi estimada em 673,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 44,2 milhões de toneladas de açúcar e 27,33 bilhões de litros de etanol. Para a safra 2026/27, a primeira estimativa indica recuperação produtiva, com previsão de 709,1 milhões de toneladas, associada ao aumento da produtividade média e da área colhida (CONAB, 2026).

A importância da cana-de-açúcar no Brasil não se limita à produção agrícola, pois a cultura está diretamente ligada à matriz energética renovável, à geração de empregos e à economia de regiões produtoras (Brinkman *et al.*, 2018). A dinâmica do setor é influenciada pela flexibilidade industrial das usinas, que podem direcionar a matéria-prima para açúcar ou etanol conforme as condições de mercado, preços internacionais, demanda interna por combustíveis e Políticas de biocombustíveis (Melo; Sampaio, 2016). Nesse contexto, a cana-de-açúcar se consolida como cultura estratégica para a transição energética, uma vez que seus produtos e coprodutos como etanol, bagaço, palhada, torta de filtro e vinhaça, possibilitam integração entre produção agrícola, energia renovável e economia circular (Soares *et al.*, 2023).

Entre os principais desafios do setor sucroenergético está a adubação, uma vez que a cana-de-açúcar apresenta elevada exigência nutricional e grande exportação de nutrientes ao longo dos cortes. O manejo inadequado da fertilidade pode comprometer a longevidade do canavial, produtividade de colmos e a sustentabilidade do sistema produtivo (Bordonal *et al.*, 2018).

3.2 Fertilizantes mineral e organomineral

O Brasil se destaca como um dos maiores consumidores mundiais de fertilizantes minerais, porém sua produção interna ainda é insuficiente para atender à demanda do setor agrícola. Essa dependência é mais crítica para os fertilizantes nitrogenados e potássicos, uma vez que a produção nacional em relação ao consumo é estimada em aproximadamente 8% para nitrogênio, 44% para fósforo e apenas 3% para potássio (Pereira; Cardoso, 2025). A adubação mineral é uma prática indispensável para sustentar a produtividade da cana-de-açúcar, pois a cultura apresenta elevada produção de biomassa e grande demanda por nutrientes ao longo do ciclo. Na cana-de-açúcar, o equilíbrio nutricional influencia produtividade de colmos, atributos tecnológicos e eficiência econômica do sistema, sendo especialmente importante em áreas conduzidas com sucessivos cortes e soqueiras (Otto et al., 2016).

Entre os fertilizantes nitrogenados, a ureia apresenta grande importância agrícola, mas sua produção está diretamente associada à disponibilidade de gás natural e outros insumos de origem fóssil. Por isso, seu preço é altamente sensível às variações do mercado energético, do câmbio e da oferta internacional (Skalski, 2025). Além da instabilidade econômica, o nitrogênio apresenta baixa eficiência de uso no sistema, pois parte do nutriente aplicado é perdido por volatilização, lixiviação, escoamento superficial e desnitrificação (Barbosa *et al.*, 2025).

O fósforo, por sua vez, é um nutriente estratégico para a agricultura, mas apresenta dois grandes desafios: sua origem em reservas minerais finitas e sua baixa eficiência em solos tropicais (Solangi *et al.*, 2023). Em solos altamente intemperizados, como muitos solos brasileiros, o fósforo aplicado via fertilizante tende a ser adsorvido ou fixado por óxidos de ferro e alumínio, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (Benício, 2022).

O potássio é outro nutriente de grande relevância para a agricultura nacional, especialmente em culturas de alta exigência nutricional. No entanto, é o elemento com maior dependência externa, pois o Brasil importa mais de 90% do potássio que consome. Essa condição torna o país vulnerável à concentração de fornecedores internacionais e às oscilações do mercado global. Além disso, o K apresenta elevada mobilidade em determinados solos, podendo ocorrer perdas por lixiviação, principalmente em solos arenosos, com baixa capacidade de troca catiônica e sob condições de alta precipitação. Assim, o manejo potássico deve considerar a textura

do solo, a capacidade de retenção de cátions, a dose, a fonte e o parcelamento da adubação, visando maior eficiência de uso e menor perda do nutriente no sistema produtivo (Rodrigues *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o Plano Nacional de Fertilizantes surge como uma estratégia para reduzir a dependência externa, ampliar a produção nacional e fortalecer a segurança do abastecimento de fertilizantes no Brasil que sofre com forte exposição a câmbio, preço internacional e choques geopolíticos (Teodoro; Rocha; Benício, 2024).

Os fertilizantes organominerais surgem como alternativa complementar à adubação mineral na cana-de-açúcar, pois combinam uma fração mineral, responsável pelo fornecimento de nutrientes em formas mais concentradas, com uma fração orgânica proveniente de resíduos agroindustriais, urbanos, vegetais ou de origem animal. Essa definição descreve os organominerais como fertilizantes formados pela associação de fertilizantes minerais com compostos orgânicos de origem natural ou derivados de processos agroindustriais, rurais ou urbanos (Gomes *et al.*, 2025).

A Instrução Normativa nº 61/2020 classifica os fertilizantes orgânicos e organominerais em Classe A ou Classe B, conforme a origem e o risco sanitário das matérias-primas. A Classe A inclui materiais de origem agropecuária, industrial, agroindustrial, vegetal, animal ou mineral, desde que isentos de contaminantes sanitários. A Classe B abrange matérias-primas de origem urbana, industrial ou agroindustrial, como resíduos sólidos urbanos e lodos de estações de tratamento de esgoto, desde que autorizadas pelos órgãos competentes e seguras para uso agrícola. Além disso, a norma define garantias mínimas para organominerais sólidos, como 8% de carbono orgânico, umidade máxima de 20%, CTC mínima de 80 mmolc kg⁻¹ e teores mínimos de nutrientes, sendo 1% quando garantidos isoladamente ou 5% para misturas como NPK, NP, NK ou PK (Brasil, 2020).

As fontes orgânicas utilizadas na formulação de organominerais são variadas, e a escolha da matriz influencia diretamente a eficiência agronômica do produto. Entre as fontes mais estudadas estão torta de filtro, vinhaça, cama de frango, esterco compostado, lodo de esgoto tratado, biossólidos, compostos agroindustriais, resíduos vegetais e biochar (Bouhia *et al.*, 2022). A revisão de Uddin *et al.* (2025) destaca que a eficiência dos organominerais depende do tipo de cultura, tipo de solo

e substrato usado na formulação, o que impede generalizações simples sobre superioridade do organomineral em qualquer condição.

3.3 Benefícios do fertilizante Organomineral

Os fertilizantes organominerais têm sido estudados como alternativa ao uso de fertilizantes minerais, principalmente por associarem nutrientes de origem mineral a matrizes orgânicas (Bouhria *et al.*, 2022).

Entre as principais matrizes orgânicas utilizadas na produção de organominerais, destacam-se a torta de filtro, o biossólido, o lodo de esgoto compostado e a cama de frango. A torta de filtro apresenta importância especial para o setor sucroenergético, por ser um resíduo gerado em grande quantidade pelas usinas e apresentar teores relevantes de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio (Mota *et al.*, 2019). Além disso, fertilizantes organominerais fosfatados produzidos com subprodutos da cana-de-açúcar têm sido avaliados como alternativa para o fornecimento de P em sistemas agrícolas (Borges *et al.*, 2019). A cama de frango também tem sido utilizada como matriz orgânica, especialmente em fertilizantes organominerais fosfatados, com efeitos positivos sobre a reciclagem e manutenção do fósforo no solo (Frazão *et al.*, 2019; Benites *et al.*, 2022).

Outro resíduo com potencial de uso é o lodo de esgoto, principalmente após tratamento adequado. Silva *et al.* (2022) relatam que o lodo de esgoto compostado pode ser utilizado como fertilizante orgânico na cultura da cana-de-açúcar, desde que sejam adotados processos que reduzam riscos associados à presença de patógenos e metais pesados. Rodrigues *et al.* (2021) também discutem o uso do lodo de esgoto como matriz orgânica para fertilizantes organominerais, destacando sua contribuição para a reciclagem de nutrientes, mas ressaltando a necessidade de avaliação dos possíveis riscos ambientais. Assim, o uso desses resíduos na composição de fertilizantes representa uma estratégia de reaproveitamento de nutrientes e redução da dependência de fontes minerais convencionais.

Um dos benefícios atribuídos aos fertilizantes organominerais está relacionado à liberação mais gradual de nutrientes. Magela *et al.* (2019) relatam que esses fertilizantes podem apresentar solubilização mais lenta, o que contribui para reduzir perdas por lixiviação, volatilização ou fixação no solo. De forma semelhante, Barbosa *et al.* (2024) desenvolveram fertilizante organomineral fosfatado peletizado à base de

resíduo orgânico e superfosfato triplo, observando que o tratamento térmico da matriz promoveu maior retenção de P e liberação mais lenta do nutriente.

Além do fornecimento de nutrientes, os fertilizantes organominerais podem influenciar positivamente os atributos químicos do solo. Moreira *et al.* (2021) observaram que organominerais formulados com biossólido e torta de filtro não promoveram acidificação do solo, reduziram a saturação por alumínio e favoreceram atributos como capacidade de troca catiônica, soma de bases e saturação por bases. Gomes *et al.* (2025) também associaram o uso de organominerais à melhoria de atributos químicos e físicos do solo. Esses efeitos são importantes porque indicam que os organominerais podem atuar não apenas como fonte de nutrientes, mas também como condicionadores da fertilidade do solo, contribuindo para a melhoria do ambiente radicular.

Na cultura da cana-de-açúcar, os organominerais têm demonstrado potencial para aumentar a produtividade e a eficiência econômica da adubação. Crusciol *et al.* (2020) observaram maiores ganhos de produtividade e maior rentabilidade acumulada com o uso de fertilizante organomineral em cana-planta e primeira soca. Moraes *et al.* (2020), ao avaliarem cana-de-açúcar fertilizada com organomineral produzido a partir de lodo de esgoto, também verificaram respostas produtivas associadas às doses do fertilizante. Esses resultados reforçam a possibilidade de utilização dos organominerais como fonte alternativa ou complementar de nutrientes em canaviais, sobretudo em sistemas que buscam maior eficiência no uso de fertilizantes.

Os efeitos positivos dos organominerais também podem estar associados à presença de compostos orgânicos bioativos, como substâncias húmicas. Canellas e Olivares (2014) discutem que as substâncias húmicas podem estimular o crescimento radicular e a atividade da H^+ -ATPase, enzima relacionada à expansão celular e à absorção de nutrientes. Jindo *et al.* (2020) também relatam que ácidos húmicos provenientes de compostos orgânicos podem favorecer a elongação radicular e a atividade da H^+ -ATPase em milho. Embora esses efeitos dependam da origem e composição da matriz orgânica, eles ajudam a explicar parte dos benefícios agrônômicos observados com o uso.

Do ponto de vista ambiental, os fertilizantes organominerais estão inseridos na lógica da bioeconomia circular, pois possibilitam a valorização de resíduos orgânicos e agroindustriais como insumos agrícolas. A conversão desses resíduos em fertilizantes contribui para o reaproveitamento de nutrientes, reduz a dependência de

fontes minerais finitas e pode diminuir impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos biodegradáveis (Hidalgo *et al.*, 2025). Nesse sentido, Valverde-Vozmediano *et al.* (2025) ressaltam que a peletização permite combinar compostos orgânicos com fontes minerais, aumentando a concentração de nutrientes, a uniformidade do produto e a facilidade de aplicação. Chojnacka (2025) e Mjanja *et al.* (2025) também destacam que os organominerais podem contribuir para o desempenho agrônomo, a saúde do solo, a redução de perdas de nutrientes e a mitigação de impactos ambientais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização

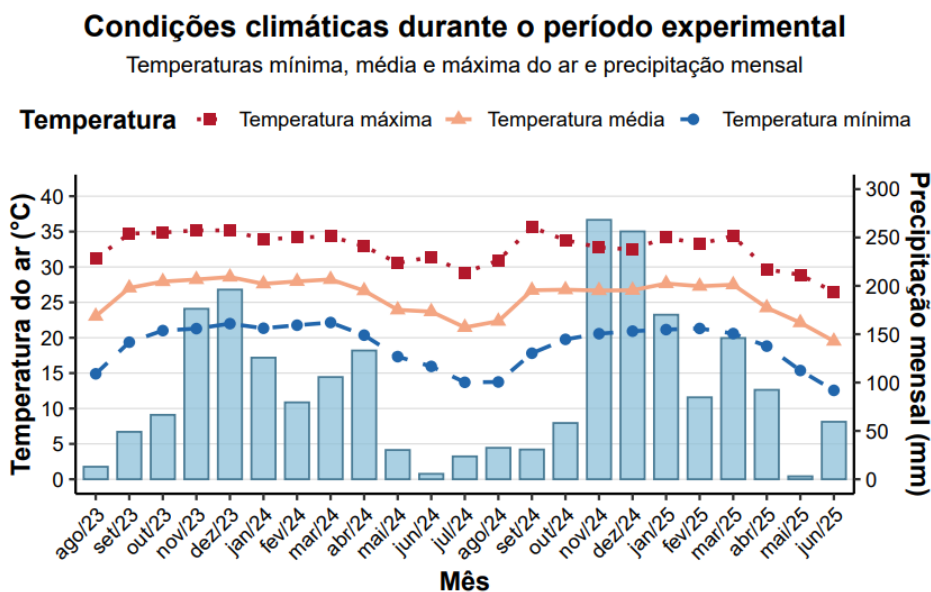
O experimento foi conduzido em área comercial de cana-de-açúcar pertencente à Usina Sucroenergética Branco Peres, localizada no município de Adamantina, SP, Brasil. O estudo foi realizado em canavial em fase de soqueira, abrangendo dois ciclos consecutivos da cultura sendo 1ª soca e à 2ª soca.

4.2 Clima

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, caracterizado por verão quente e chuvoso e inverno seco. A área experimental está localizada nas coordenadas 21°52'50" S e 51°06'13" W, a 309 m de altitude. A região apresenta temperatura média anual de aproximadamente 24 °C e precipitação média anual de 1.300 mm, com temperatura média máxima de 25 °C e média mínima de 23 °C.

Durante o período experimental, os dados meteorológicos de precipitação pluvial e temperatura do ar foram obtidos a partir da estação meteorológica utilizada para o acompanhamento climático da área experimental, sendo empregados para caracterizar as condições ambientais durante a condução da 1ª e da 2ª socas. As condições meteorológicas observadas no período experimental estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Condições meteorológicas durante a realização da pesquisa. Ano agrícola 2023/2024 e 2024/2025, Adamantina, SP



Barras representam a precipitação mensal; linhas representam as temperaturas. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Solo

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018). Antes da aplicação dos tratamentos, foram coletadas amostras de solo na camada de 0–0,20 m para a caracterização química inicial da área experimental, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores dos atributos químicos do solo durante instalação do projeto adubado com dose de fertilizante organomineral e mineral no ano agrícola 2023/24. Adamantina, SP

Camada (cm)	pH	M.O g kg ⁻¹	P (resina) ----- mg dm ⁻³ ----	S	K -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca	Mg
0-20	6,3	15,8	7,0	4,6	6,3	29	10
Camada (cm)	Al	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB	CTC	V ----- % -----	m	
0-20	0	11,9	45	57	79	0	

P, Ca, Mg e K: resina; S-SO₄: Ca (H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹; B: BaCl₂.2H₂O 0,125%. Fonte:

Elaborado pelo autor

4.4 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. O fertilizante organomineral utilizado foi fornecido pela empresa Ferticel, com composição de 60% de fração mineral e 40% de fração orgânica, tendo como matriz orgânica a cama de frango. Os tratamentos consistiram em ausência de adubação, adubação mineral convencional e quatro doses de fertilizante organomineral, correspondentes a 125%, 100%, 75% e 50% da dose recomendada de nutrientes para a cultura da cana-de-açúcar. A formulação e descrição das doses de fertilizante organomineral e mineral aplicadas em cada tratamento está apresentada na Tabela 2.

As parcelas experimentais continham 90 m², sendo constituídas por seis linhas de cana-de-açúcar, espaçadas em 1,5 m, com 10 m de comprimento. O intervalo entre parcelas foi de 2,0 m, e entre os blocos foi mantido um carreador correspondente à distância de duas linhas de cana-de-açúcar, equivalente a 3,0 m.

O experimento foi instalado em 06/10/2023 para avaliação da 1ª soca e reaplicado em 01/11/2024 para avaliação da 2ª soca, em área cultivada com a cultivar RB975201.

Tabela 2 - Doses de fertilizante organomineral e adubação mineral aplicadas na cana-de-açúcar, cultivar RB975201, durante a 1ª e a 2ª socas, em Adamantina, SP

Tratamentos	Fertilizante	Proporção da dose	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		(%)	----- kg ha ⁻¹ -----		
T1	Controle	0	0	0	0
T2	Fertilizante mineral	100	100	40	120
T3	Fertilizante organomineral	125	125	50	150
T4	Fertilizante organomineral	100	100	40	120
T5	Fertilizante organomineral	75	75	30	90
T6	Fertilizante organomineral	50	50	20	60

Organomineral: 13 – 5 - 15 Mineral: 20 – 8 – 24 Fonte: Elaborado pelo autor.

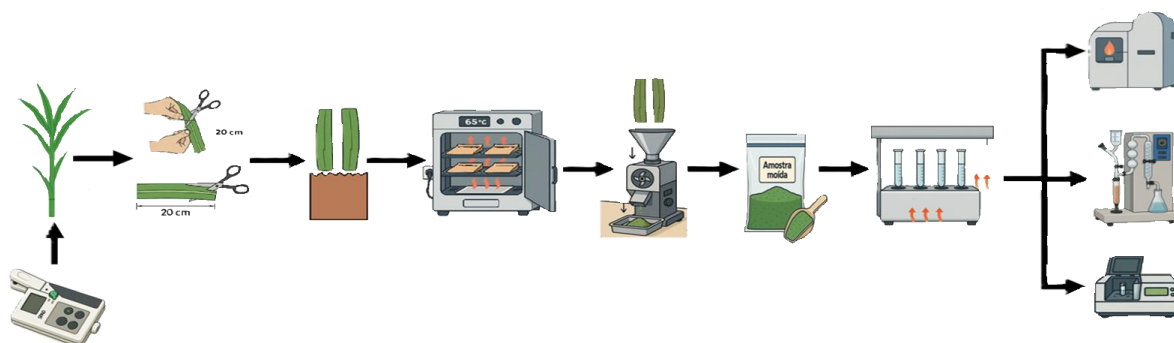
4.5 AVALIAÇÕES

4.5.1 Estado nutricional das plantas e teor de clorofila pelo índice SPAD

Durante a fase de maior desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, foram coletadas de acordo com o estágio fenológico a folha diagnóstica +1 recomendada para a cultura. Após a coleta, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa de circulação forçada de ar a 65–70 °C até massa constante. Em seguida, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e armazenadas para posterior análise química. A determinação dos teores de nutrientes no tecido vegetal foi realizada conforme metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). O nitrogênio foi determinado por digestão sulfúrica, enquanto os teores de P, K, Ca, Mg e S foram determinadas com digestão nítrico-perclórica. Os resultados dos macronutrientes foram expressos em g kg⁻¹ de matéria seca.

Simultaneamente à coleta foliar, foi determinado o índice relativo de clorofila por meio do clorofilômetro portátil Minolta SPAD-502. As leituras foram realizadas na folha +1 de 10 plantas por parcela, na região mediana da lâmina foliar, evitando-se a nervura central, conforme descrito por Uddling *et al.* (2007).

Figura 2 - Esquema ilustrativo da leitura do índice SPAD, coleta da folha diagnóstica +1 e preparo da amostra foliar para determinação dos teores de macronutrientes em cana-de-açúcar



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2. Perfilamento e número de colmos

O perfilamento da cana-de-açúcar foi avaliado aos 70 e 160 dias após a aplicação dos tratamentos, bem como antes da colheita, para determinação do número final de colmos. A contagem foi realizada nas linhas centrais de cada parcela, utilizando-se um segmento de 3 m lineares, descartando-se 2 m de bordadura em cada extremidade da parcela.

4.5.3 Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar

Para a avaliação tecnológica da cana-de-açúcar, foram selecionados aleatoriamente doze colmos por parcela no momento da colheita. Após a retirada do ponteiro e da palha, os colmos foram identificados, pesados e encaminhados ao laboratório para a determinação dos atributos tecnológicos da matéria-prima.

O teor de sólidos solúveis do caldo, expresso em °Brix, foi determinado por meio de refratômetro digital de leitura automática. A pol do caldo, correspondente ao teor aparente de sacarose no caldo, foi determinada por sacarímetro digital automático, a partir da leitura sacarimétrica do caldo clarificado, conforme a Equação 1:

$$S = LPol \times (0,2605 - 0,0009882 \times B) \quad (1)$$

Onde: S = pol do caldo (%); LPol = leitura sacarimétrica do caldo clarificado; B = Brix do caldo.

O teor de fibra da cana-de-açúcar foi estimado a partir do peso úmido do bagaço da prensa, conforme a Equação 2:

$$F = 0,08 \times PBU + 0,876 \quad (2)$$

Onde: F = teor de fibra da cana-de-açúcar (%); PBU = peso do bagaço úmido da prensa (g).

A umidade da amostra foi calculada pela relação entre a massa úmida e a massa seca, conforme a Equação 3:

$$U = (Pmu - Pms) / Pmu \times 100 \quad (3)$$

Onde: U = umidade da amostra (%); Pmu = peso da massa úmida; Pms = peso da massa seca.

O coeficiente de transformação da pol do caldo extraído pela prensa em pol da cana foi calculado em função do teor de fibra, conforme a Equação 4:

$$C=1,0313-0,00575\times F \quad (4)$$

Onde: C = coeficiente de transformação; F = teor de fibra da cana-de-açúcar (%).

A pol da cana foi calculada a partir da pol do caldo, do teor de fibra e do coeficiente de transformação, conforme a Equação 5:

$$PC=S\times(1-0,01\times F)\times C \quad (5)$$

Onde: PC = pol da cana (%); S = pol do caldo (%); F = teor de fibra da cana-de-açúcar (%); C = coeficiente de transformação.

A pureza aparente do caldo foi calculada pela relação entre a pol do caldo e o Brix do caldo, conforme a Equação 6:

$$Q=(100\times S)/B \quad (6)$$

Onde: Q = pureza aparente do caldo (%); S = pol do caldo (%); B = Brix do caldo.

O teor de açúcares redutores do caldo foi estimado em função da pureza aparente do caldo, conforme a Equação 7:

$$AR=3,641-0,0343\times Q \quad (7)$$

Onde: AR = açúcares redutores do caldo (%); Q = pureza aparente do caldo (%).

Em seguida, os açúcares redutores da cana foram calculados a partir dos açúcares redutores do caldo, do teor de fibra e do coeficiente de transformação, conforme a Equação 8:

$$ARC=AR\times(1-0,01\times F)\times C \quad (8)$$

Onde: ARC = açúcares redutores da cana (%); AR = açúcares redutores do caldo (%); F = teor de fibra da cana-de-açúcar (%); C = coeficiente de transformação.

Após a obtenção da pol da cana e dos açúcares redutores da cana, o açúcar total recuperável foi calculado conforme a Equação 9:

$$\text{ATR} = 9,52603 \times \text{PC} + 9,05 \times \text{ARC} \quad (9)$$

Onde: ATR = açúcar total recuperável, expresso em kg t⁻¹ de cana; PC = pol da cana (%); ARC = açúcares redutores da cana (%).

4.5.4 Atributos físicos, químicos e enzimáticos do solo

Antes da colheita do experimento, foram coletadas amostras de solo para avaliação dos atributos químicos e biológicos. Para as análises biológicas (arilsulfatase e β -glicosidase), as amostras foram coletadas na camada de 0,00–0,10 m, a aproximadamente 0,10 m da touceira. Para as análises químicas (pH, H+Al, matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, S e P-remanescente), as amostras foram coletadas na camada de 0,00–0,20 m. Após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira com malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

A caracterização química do solo foi realizada conforme os métodos descritos por Raij *et al.* (2001). Foram determinados o pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, a matéria orgânica por método colorimétrico, os teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio por extração com resina trocadora de íons, a acidez potencial (H+Al) por solução tampão SMP e, quando avaliado, o enxofre na forma de sulfato (S-SO₄²⁻). O fósforo remanescente (P-rem) foi determinado conforme metodologia descrita por Alvarez V. *et al.* (2000), utilizando solução de CaCl₂ 0,010 mol L⁻¹ contendo 60 mg L⁻¹ de P, na relação solo:solução de 1:10. Após agitação e obtenção da solução de equilíbrio, a concentração de P foi determinada por colorimetria em espectrofotômetro UV-visível, sendo os resultados expressos em mg L⁻¹.

A atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase foi determinada conforme a Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo — BioAS, descrita por Mendes *et al.* (2021). Essas enzimas são utilizadas como bioindicadores associados aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente. A quantificação foi realizada pela liberação de p-nitrofenol após incubação das amostras com substratos específicos, sendo p-

nitrofenil sulfato para arilsulfatase e p-nitrofenil- β -D-glicosídeo para β -glicosidase. Os resultados foram expressos em μg de p-nitrofenol g^{-1} de solo h^{-1} .

4.5.5 Produção de colmos

A produção de colmos foi determinada pelo método tradicional, com a pesagem de 15 colmos cortas em sequência em cada uma das quatro linhas centrais, totalizando 60 colmos, descartando-se dois metros de bordadura, sendo posteriormente os valores transformados para t ha^{-1} (TCH).

A produtividade de colmos foi determinada no momento da colheita da 1ª e da 2ª socas, por meio da colheita manual dos colmos presentes na área útil de cada parcela. Foram utilizadas as quatro linhas centrais, descartando-se 2 m de bordadura em cada extremidade da parcela. Os colmos foram cortados, despilhados, despontados e pesados em campo, sendo 15 por linha nas 4 parcelas centrais, totalizando 60 colmos.

A produtividade de colmos foi calculada com base na massa total de colmos obtida na área útil da parcela e posteriormente extrapolada para toneladas por hectare, conforme a equação:

$$\text{TCH} = (\text{P}_{60}/60) \times \text{NCM} \times (10/\text{E}) \quad (10)$$

Onde: TCH = produtividade de colmos, em t ha^{-1} ; P_{60} = peso de 60 colmos, em kg; 60 = número de colmos pesados; NCM = número de colmos por metro linear; E = espaçamento entre linhas.

4.5.6 Densidade de raízes

A densidade de raízes foi determinada por meio da coleta de amostras de solo com raízes, utilizando-se trado holandês, na camada de 0–0,20 m, a 0,10 m da base da touceira das plantas.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em recipientes identificados e encaminhadas ao laboratório. Em seguida, foram lavadas em água corrente sobre peneira de 2 mm, para remoção do solo aderido e separação das raízes. Após a lavagem, as raízes foram separadas manualmente de resíduos vegetais e impurezas,

acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante.

Posteriormente, as raízes secas foram pesadas em balança de precisão, e os resultados foram expressos como densidade de raízes, em g dm^{-3} de solo, conforme adaptação dos procedimentos descritos por Mommer *et al.* (2012).

$$DR = (MSR \times 1000) / V_t \quad (11)$$

Onde: DR = densidade de raízes; MSR = massa seca de raízes; V_t = volume de solo amostrado pelo trado; 1000 = fator de conversão de cm^3 para dm^3 .

Figura 3 - Modelo de coleta e preparo das amostras de densidade das raízes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.7 Análise estatística

Para cada variável avaliada, foram verificados indicadores de qualidade experimental e pressupostos estatísticos, como a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. Essa etapa foi realizada com o objetivo de avaliar a consistência dos dados e a adequação das variáveis à análise de variância.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) no software R, utilizando-se o pacote *easyanova*, considerando o delineamento em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições. As médias foram comparadas pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade (Arnhold, 2013; R Core Team, 2025). As rotinas complementares de leitura, organização e exportação dos dados foram realizadas com auxílio dos pacotes *readxl*, *dplyr*, *stringr* e *openxlsx*.

Foi realizada análise de correlação de Pearson com o objetivo de identificar associações lineares entre as variáveis avaliadas. As matrizes de correlação e os respectivos valores de significância foram obtidos com auxílio do pacote Hmisc, enquanto os gráficos foram elaborados com os pacotes ggplot2 e tidyr (Harrell Jr., 2026; Wickham, 2016). A interpretação da magnitude dos coeficientes foi realizada conforme Schober, Boer e Schwarte (2018), considerando-se o valor absoluto de r : desprezível (0,00–0,10), fraca (0,10–0,39), moderada (0,40–0,69), forte (0,70–0,89) e muito forte (0,90–1,00). Para facilitar a visualização e destacar apenas associações de maior relevância, os gráficos apresentaram somente correlações com $|r| \geq 0,40$, correspondentes a relações de magnitude pelo menos moderada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produtividade e perfilhamento

Para a produtividade de colmos (TCH) da variedade RB97-5201, não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos na primeira soca e na produção acumulada (Figura 4). Contudo, na segunda soca, obteve efeito significativo dos tratamentos, em que a aplicação de 75% da dose via organomineral resultou em produtividade superior à do controle sem adubação, diferindo estatisticamente pelo teste de Duncan. As demais doses, incluindo mineral 100% e os tratamentos com organomineral 125%, 100% e 50%, apresentaram comportamento intermediário.

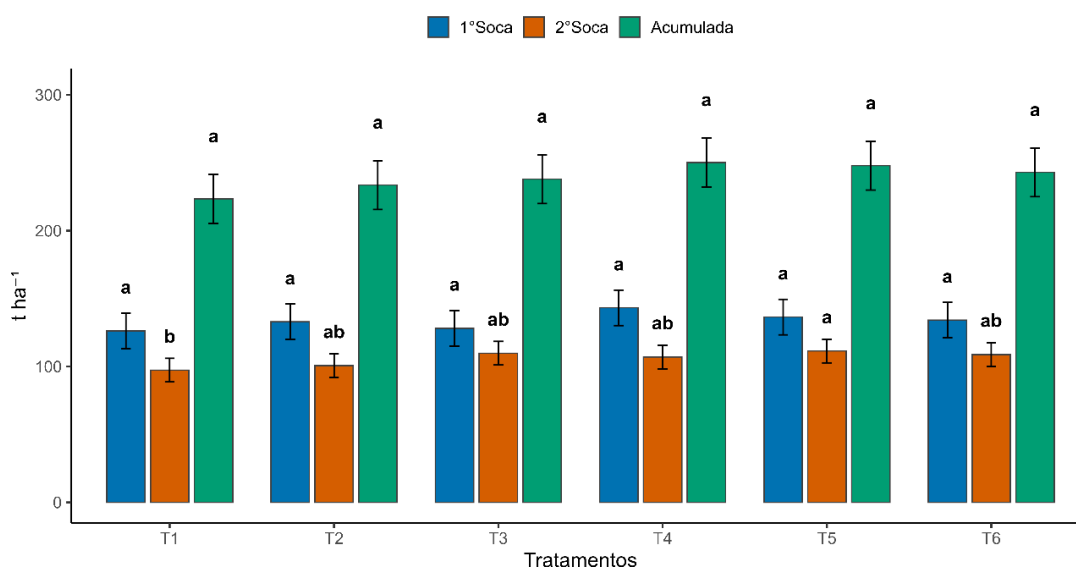
A superioridade do tratamento com 75% de organomineral, com incremento de aproximadamente 14,6% em relação ao controle, indica que a resposta da cultura à adubação organomineral ocorreu de forma não linear, sugerindo maior eficiência agrônômica em dose intermediária. Esse resultado sugere a possibilidade de substituição parcial da adubação mineral por fertilizantes organominerais, desde que em doses ajustadas às condições de cultivo e à exigência da cultura. Em estudos com cana-de-açúcar, Ramos (2013) também observou que a resposta à cama de frango e ao composto organomineral pode variar entre ciclos.

A dinâmica de perfilhamento revelou diferenças significativas apenas aos 70 dias da segunda soca (Tabela 3), quando o T5 apresentou menor densidade populacional de colmos. Aos 160 dias, a diferença entre os tratamentos foi diluída, o que sugere estabilização da população de colmos ao longo do desenvolvimento da cultura, esse comportamento é compatível com o processo natural de mortalidade de perfilhos e ajuste populacional da cana-de-açúcar, descrito por Vasantha *et al.* (2012) como autoafinamento da cultura. Entretanto, essa menor população inicial não se refletiu em menor produtividade, ao contrário, o tratamento apresentou a maior TCH no ciclo.

Dessa forma, os resultados evidenciam que elevado perfilhamento não assegura, por si só, maior rendimento agrícola. A maior produtividade observada no tratamento com 75% de organomineral sugere que houve compensação fisiológica entre população e desempenho individual dos colmos, favorecendo o estabelecimento e a manutenção de colmos mais vigorosos. Esse comportamento se relaciona com a dinâmica dos fertilizantes organominerais, cuja fração orgânica pode promover

liberação gradual de nutrientes e melhorar a eficiência de uso pela cultura (Uddin *et al.*, 2025).

Figura 4 - Produtividade de colmos em função das doses aplicadas de adubo organomineral e mineral na soqueira da cana-de-açúcar. Ano agrícola 2023/24 e 2024/25. Adamantina, SP



Barras representam as médias dos tratamentos e as linhas verticais indicam a variância da média.

Letras diferentes entre si diferem pelo teste de Duncan a 5%. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Perfilamento de colmos de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	Perfilamento 70 D			Perfilamento 160 D		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	nº de colmo.	metro linear	%	nº de colmo.	metro linear	%
T1	10,22	12,75 (0,0%) a	24,76	11,06	11,88 (0,0%)	7,42
T2	9,95	13,85 (8,7%) a	39,24	10,79	12,18 (2,5%)	12,91
T3	10,40	13,40 (5,1%) a	28,81	10,73	12,33 (3,8%)	14,90
T4	11,31	13,02 (2,1%) a	15,13	11,35	12,72 (7,1%)	12,08
T5	9,67	10,85 (-14,9%) b	12,25	10,81	11,78 (-0,9%)	8,95
T6	9,60	13,81 (8,3%) a	43,88	11,41	12,22 (2,8%)	7,09
Pr>Fc	0,49 ^{ns}	<0,001	---	0,79 ^{ns}	0,22 ^{ns}	---
Média	10,19	12,95	27,34	11,03	12,19	10,56
CV (%)	12,82	6,15	---	7,85	6,51	---

70 D: 70 dias após aplicação dos tratamentos. 160 D: 160 dias após aplicação dos tratamentos. Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Índice SPAD e densidade de radicular a 0 – 0,20 m

A aplicação dos tratamentos influenciou significativamente o índice SPAD e a densidade de raízes na camada de 0,0–0,20 m (Tabela 4). Para o SPAD, na 1ª soca, os maiores valores foram observados nos tratamentos com 100% mineral e organomineral, enquanto T5 e T6 apresentaram os menores valores. Os tratamentos T1 e T3 apresentaram comportamento intermediário.

Na 2ª soca, os tratamentos T2, T3, T4 e T5 compuseram o grupo de maiores valores de SPAD, enquanto T1 e T6 apresentaram os menores valores, que são controle e a menor dose de organomineral. De modo geral, observou-se redução do SPAD da 1ª para a 2ª soca em todos os tratamentos, com queda média de 19,43%, indicando alteração no estado fisiológico da cultura entre os ciclos agrícolas. Contudo, esse comportamento não deve ser atribuído exclusivamente à idade da planta, uma vez que diferenças entre anos agrícolas, ambiente e manejo também podem ter contribuído para essa variação (Zhang et al., 2026).

A densidade de raízes na camada de 0–0,20 m foi influenciada significativamente pelos tratamentos nas duas socas (Tabela 4). Na 1ª soca, os maiores valores foram observados nos tratamentos sem adubação e 75% da dose de organomineral, ambos pertencentes ao grupo superior pelo teste de Duncan, enquanto a adubação mineral apresentou a menor densidade radicular, pode estar associado a fatores como efeito salino dos fertilizantes minerais que podem inibir o desenvolvimento ou pela maior disponibilidade de nutrientes devido a solubilidade imediata (Gurgel, 2015; Laforet, 2013). As doses de 125%, 100% e 50% do organomineral apresentaram comportamento intermediário, sem diferir estatisticamente dos grupos extremos.

Na 2ª soca, houve alteração no padrão de resposta, com destaque para o tratamento correspondente a 125% da dose de organomineral, que apresentou a maior densidade de raízes e superou os demais tratamentos. As doses de 75% e 50% apresentaram valores intermediários, enquanto a dose de 100% do organomineral apresentou o menor valor de densidade radicular na camada avaliada. O tratamento

sem adubação manteve comportamento intermediário, ao passo que a adubação mineral apresentou valor inferior aos tratamentos com 125%, 75% e 50% do organomineral.

O trabalho de Nagasawa et al. (2016) evidencia que os esterco quando usados para fins agrônômicos tem capacidade de promover o desenvolvimento radicular, com a liberação de compostos fenólicos e os ácidos fenólicos, como o éster metílico do ácido 3,4-dimetoxibenzoico um dos compostos identificados com capacidade auxínica e oxidante para a planta. Tal capacidade de alongamento radicular vem da capacidade dos compostos húmicos na ativação de bombas de prótons, que acidificam a parede celular, permitindo a ação das expansinas que em condições ideais alongam a células (Canellas *et al.*, 2002). Isso explica parte dos resultados, onde aplicação de organomineral no primeiro ano impulsionou o desenvolvimento radicular em comparação ao mineral, onde no segundo ano foi observado que a dose de organomineral ultrapassou a densidade radicular da testemunha, o que se dá pelo ano consecutivo de manejo, no entanto a dose 100% apresentaram efeito minimizante devido à exaustão fisiológica da dose aplicada.

Tabela 4 - SPAD e Raiz 0-20 cm da cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	SPAD			Raiz 0 -0,20 m		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
			%		g dm-3	%
T1	51,03 ab	39,45 (0,0%) b	-22,69	17,78 a	18,98 (0,0%) bc	6,76
T2	56,13 a	42,33 (7,3%) a	-24,59	9,56 b	12,46 (-34,4%) cd	30,33
T3	52,98 ab	44,05 (11,7%) a	-16,86	14,53 ab	27,80 (46,5%) a	91,35
T4	55,85 a	42,35 (7,4%) a	-24,17	15,52 ab	11,59 (-38,9%) d	-25,33
T5	48,83 b	42,98 (8,9%) a	-11,99	16,49 a	20,07 (5,7%) b	21,73
T6	47,43 b	39,70 (0,6%) b	-16,3	12,26 ab	20,35 (7,2%) b	65,96
Pr>Fc	0,02	<0.001	---	0	0	---
Média	52,04	41,81	-19,43	14,36	18,54	31,8
CV (%)	7,15	2.98	---	16,16	25,02	---

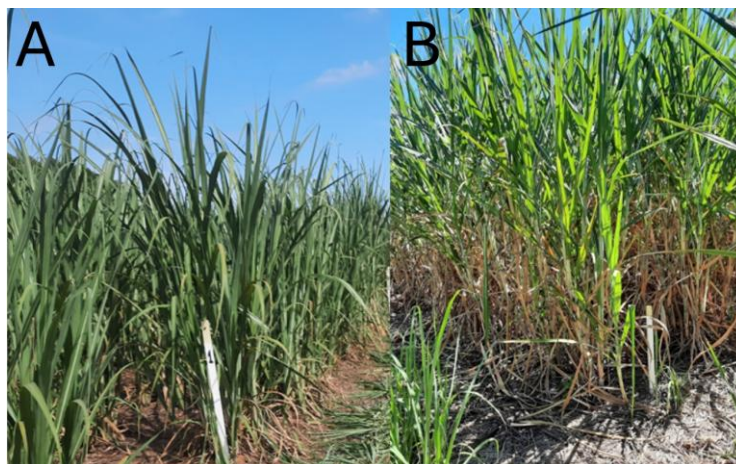
Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Teores de nutrientes

Os teores foliares de N apresentaram comportamento distinto entre as duas socas avaliadas na mesma área experimental (Tabela 5). Na 1ª soca, o teor de N foliar foi influenciado pelos tratamentos, com maior valor no tratamento T5, correspondente a 75% da dose recomendada via fertilizante organomineral, enquanto o tratamento T6, com 50% da dose organomineral, apresentou o menor teor. A adubação mineral convencional (T2) apresentou comportamento intermediário-superior, não diferindo do tratamento de maior teor. Esses resultados indicam que, no primeiro ciclo avaliado, a resposta do N foliar foi proporcional ao aumento da dose organomineral, uma vez que as doses de 125% e 100% não superaram a dose de 75%, mas sim regrediram ao excesso do adubo.

Na 2ª soca, observou-se aumento expressivo dos teores de N foliar em todos os tratamentos, isso se deve conforme ilustrado na figura 5, durante o 1 ano experimental ocorreu momentos de veranico durante o período de águas na área experimental. O maior teor foi registrado no tratamento T6, enquanto T5 apresentou o menor valor, e os demais tratamentos permaneceram em posição intermediária. A variabilidade temporal nos teores de N, com aumento expressivo entre o primeiro e o segundo ano, correlaciona-se diretamente com o regime pluviométrico (Figura 5). A disponibilidade hídrica modula a absorção e presença dos nutrientes no tecido da planta, comportamento corroborado por *Morais et al.* (2022), que reportaram oscilações na concentração de N foliar (8,29 a 19,09 g kg⁻¹) dependendo da lâmina de irrigação.

Figura 5 - Pontas secas devido ao estresse hídrico: (A) foto de novembro de 2023; (B) Foto de março de 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o P foliar (Tabela 5), os tratamentos não promoveram diferenças estatísticas dentro de cada soca. Na 1ª soca, os teores permaneceram dentro da faixa adequada para a cultura, enquanto na 2ª soca houve aumento generalizado, com valores próximos. Notou-se um incremento de aproximadamente 50% nos teores foliares da segunda soca em relação à primeira, inclusive no tratamento controle. Resultado evidencia o efeito da aplicação do nutriente e a ciclagem da matéria orgânica, processos potencializados por condições de umidade favoráveis, segundo Jindo *et al.* (2020) descrevem que a presença de compostos orgânicos na cama de frango reduz a adsorção específica do fosfato aos óxidos de ferro e alumínio (fenômeno de fixação), aumentando a eficiência da adubação fosfatada. Trabalhos com fosfatados de maior eficiência e com torta de filtro enriquecida mostram que parte do P aplicado no plantio permanece em solos com palhada, podendo sustentar teores foliares elevados e produtividade, mesmo na ausência de reaplicação imediata (Albuquerque *et al.*, 2016; Arruda *et al.*, 2019). Tais condições favorecem o aumento e reciclagem de Ca^{2+} e Mg^{2+} conforme evidenciado seu aumento na Tabela 6 e 7, apesar de não serem significantes os cortes (Silva *et al.*, 2022).

Tabela 5 - N e P foliar de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	N Foliar			P Foliar		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	g kg ⁻¹		%	g kg ⁻¹		%
T1	9,89 (0,0%) bc	19,49 (0,0%) ab	107,82	2,06 (0,0%)	3,08 (0,0%)	49,55
T2	12,21 (34,3%) ab	19,45 (-0,2%) ab	54,40	1,94 (-5,8%)	3,03 (-1,6%)	56,19
T3	11,31 (20,6%) ac	20,18 (3,5%) ab	78,47	1,87 (-9,2%)	2,90 (-6,0%)	54,83
T4	11,86 (26,4%) ac	20,06 (2,9%) ab	69,17	2,04 (-1,0%)	3,15 (2,2%)	54,37
T5	12,45 (32,7%) a	19,12 (-1,9%) b	53,57	1,99 (-3,4%)	3,15 (2,4%)	58,50
T6	9,51 (1,4%) c	20,54 (5,3%) a	115,93	2,09 (1,5%)	3,13 (1,7%)	49,86
Pr>Fc	0,06	0,17	---	0,32 ^{ns}	0,43 ^{ns}	---
Média	11,20	19,81	79,89	2	3,07	53,89
CV (%)	13,16	4,03	---	7,27	6,32	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores foliares de K apresentaram estabilidade na 1ª soca (Tabela 6), sem diferenciação entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5%. Os valores permaneceram entre 15,02 e 16,04 g kg⁻¹, indicando que, no primeiro ciclo avaliado, a adubação mineral convencional e as doses de fertilizante organomineral não promoveram alterações consistentes no estado potássico da planta. Esse comportamento é coerente com Ramos (2013), que também observou ausência de diferença significativa entre cama de frango, composto organomineral e fertilização mineral para os teores foliares de K em cana-soca. Na 2ª soca, entretanto, houve maior discriminação entre tratamentos, com os maiores teores observados em T3 e T4, correspondentes a 125% e 100% da dose recomendada via organomineral, enquanto o tratamento sem adubação apresentou o menor teor foliar. Esse resultado indica que, no segundo ciclo, as doses mais altas do organomineral favoreceram a manutenção do K foliar em níveis superiores ao controle, Teixeira (2013) também observaram aumento do K foliar em função das doses aplicadas em cana-de-açúcar, sugerindo que a resposta do K pode estar associada à dose e ao efeito do manejo.

Tabela 6 - K e Ca foliar de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	K Foliar			Ca Foliar		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	g kg ⁻¹		%	g kg ⁻¹		%
T1	15,02 (0,0%)	14,44 (0,0%) b	-3,87	1,40 (0,0%)	3,02 (0,0%)	115,81
T2	15,22 (1,3%)	14,75 (2,1%) ab	-3,1	1,57 (12,1%)	3,08 (2,1%)	96,44
T3	15,39 (2,5%)	15,81 (9,5%) a	2,7	1,37 (-2,1%)	2,94 (-2,5%)	114,94
T4	15,40 (2,5%)	16,00 (10,8%) a	3,92	1,39 (-0,7%)	2,95 (-2,4%)	112,2
T5	15,85 (5,5%)	15,04 (4,2%) ab	-5,11	1,53 (9,3%)	3,08 (1,9%)	101,2
T6	16,04 (6,8%)	15,35 (6,3%) ab	-4,27	1,70 (21,4%)	3,17 (5,0%)	86,61
Pr>Fc	0,16 ^{ns}	0,08	---	0,50 ^{ns}	0,89 ^{ns}	---
Média	15,49	15,23	-1,62	1,49	3,04	104,53
CV (%)	3,66	5,04	---	18,42	10,12	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o S foliar (Tabela 7), houve efeito dos tratamentos pelo teste de Duncan a 5% nas duas socas. Na 1ª soca, o tratamento sem adubação apresentou o menor teor, enquanto as doses de 100% e 75% do organomineral foram classificadas no grupo superior. Entretanto, os tratamentos com adubação mineral, 125% e 50% do organomineral apresentaram comportamento intermediário, indicando ausência de resposta linear às doses. Na 2ª soca, a adubação mineral e as doses de 125%, 100% e 50% do organomineral apresentaram os maiores teores de S foliar, enquanto o controle e a dose de 75% ficaram no grupo inferior, tal comportamento do tratamento T5 se repete a Tabela 5 no teor de nitrogênio, isso se deve ao efeito de diluição, a maior produtividade de colmos (Figura 4) proporcionada por esta dose resultou na distribuição do nutriente absorvido para uma maior biomassa vegetal, reduzindo sua concentração relativa no tecido (Faroni *et al.*, 2009).

Tabela 7 - Mg e S foliar de cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	Mg Foliar			S Foliar		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	g kg ⁻¹		%	g kg ⁻¹		%
T1	1,79 (0,0%)	2,53 (0,0%)	41,34	1,61 (0,0%) b	1,61 (0,0%) b	-0,36
T2	1,92 (7,3%)	2,59 (2,4%)	34,9	1,96 (21,2%) ab	1,96 (21,2%) a	1,92
T3	1,72 (-3,9%)	2,47 (-2,4%)	43,53	1,95 (20,9%) ab	1,95 (20,9%) a	0,08
T4	1,87 (4,5%)	2,37 (-6,2%)	26,91	1,89 (17,0%) a	1,89 (17,0%) a	-8,74
T5	1,85 (3,4%)	2,46 (-2,7%)	33,07	1,70 (5,2%) a	1,70 (5,2%) b	-19,91
T6	1,83 (2,2%)	2,62 (3,7%)	43,32	1,93 (19,6%) ab	1,93 (19,6%) a	-2,5
Pr>Fc	0,47 ^{ns}	0,66 ^{ns}	---	0	0	---
Média	1,83	2,51	37,18	1,84	1,84	-4,92
CV (%)	7,55	8,84	---	6,56	6,56	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Atributos químicos e biológicos do solo

Os valores de pH do solo não foram influenciados pelos tratamentos em nenhuma das socas avaliadas (Tabela 8), indicando que a adubação mineral convencional e as doses de fertilizante organomineral não promoveram alterações estatisticamente nesse atributo.

Para H + Al (Tabela 8), houve efeito dos tratamentos pelo teste de Duncan a 5%. Na 1ª soca, o tratamento com 125% da dose recomendada via organomineral apresentou o menor valor de acidez potencial, enquanto a dose de 50% apresentou o maior valor. Os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário. Na 2ª soca, a maior acidez potencial foi observada no tratamento com adubação mineral convencional, enquanto os tratamentos com 125%, 100% e 50% do organomineral, além do controle, apresentaram menores valores. Esse resultado sugere que, no segundo ciclo, a matriz organomineral pode ter contribuído para maior tamponamento químico do solo em comparação à fonte exclusivamente mineral, embora a resposta não tenha sido linear entre doses. Este comportamento segundo Haynes e Mokolobate (2001) descrevem que a matéria orgânica quando aplicada a longo prazo tem capacidade de elevar levemente o pH pela alcalinização biológica resultante da descarboxilação da MO presente no solo e à complexação do Al por ácidos orgânicos alifáticos.

Tabela 8 - pH e H+Al no solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	pH			H + Al		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	-----			-----		
			%			%
				mmolc dm ⁻³		
T1	6,24 (0,0%)	5,95 (0,0%)	-4,65	12,98 (0,0%) ab	15,87 (0,0%) b	22,27
T2	6,35 (1,8%)	5,84 (-1,8%)	-8,03	12,25 (-5,6%) ab	20,11 (26,7%) a	64,16
T3	6,48 (3,8%)	6,00 (0,8%)	-7,41	11,14 (-14,2%) b	16,88 (6,4%) b	51,53
T4	6,09 (-2,4%)	5,99 (0,6%)	-1,64	13,98 (7,7%) ab	17,04 (7,4%) b	21,89
T5	6,27 (0,5%)	6,09 (2,3%)	-2,87	12,34 (-4,9%) ab	17,63 (11,1%) ab	42,87
T6	6,29 (0,8%)	6,10 (2,5%)	-3,02	14,65 (12,9%) a	16,03 (1,1%) b	9,42
Pr>Fc	0,63 ^{ns}	0,78 ^{ns}	---	0,21	0,03	---
Média	6,29	5,99	-4,6	12,89	17,26	35,36
CV (%)	4,93	4,52	---	15,4	9,61	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores de matéria orgânica do solo não foram influenciados pelos tratamentos na 1ª soca (Tabela 9), indicando que, no primeiro ciclo de avaliação, a adubação mineral convencional e as doses do fertilizante organomineral não promoveram alterações detectáveis nesse atributo. Na 2ª soca, entretanto, houve diferenciação entre tratamentos pelo teste de Duncan a 5%, com maior teor de MO no tratamento T6, correspondente a 50% da dose recomendada via organomineral, no enquanto o fertilizante organomineral à base de cama de frango ser fonte adicional de carbono, o tratamento com 75% da dose organomineral apresentou menor incremento de matéria orgânica entre a 1ª e a 2ª soca em relação ao controle. Esse comportamento pode estar associado à oferta de carbono lábil e nutrientes nesse tratamento, estimularam a atividade microbiana e a mineralização da matéria orgânica, causando o efeito priming, com consequente perda de C na forma de CO₂, conforme relatado por Tito *et al.* (2021) que os compostos de cama de frango fornecem C lábil e N, estimulando a respiração microbiana e aumentando a mineralização

Para P-resina (Tabela 9), houve efeito dos tratamentos na 1ª soca, com maiores teores nos tratamentos T3 e T5, correspondentes a 125% e 75% da dose recomendada via organomineral, enquanto T6, com 50%, apresentou o menor valor.

Esse resultado indica que o organomineral foi capaz de elevar a disponibilidade de P no solo em determinadas doses, mas sem resposta linear.

Na 2ª soca, os teores de P-resina aumentaram expressivamente em todos os tratamentos, mas sem diferença estatística entre eles pelo Duncan. Segundo Crusciol *et al.* (2020), o P organomineral depende da mineralização do solo para sua disponibilidade, o que resulta em liberação lenta de P, respondendo a disponibilidade residual.

Tabela 9 - MO e P (resina) do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	M.O			P (resina)		
	1ª	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	g dm ⁻³			mg dm ⁻³		
			%			%
T1	14,52 (0,0%)	21,95 (0,0%) ab	51,17	7,00 (0,0%) bc	22,22 (0,0%)	217,43
T2	13,83 (-4,8%)	20,85 (-5,0%) ab	50,76	8,24 (17,7%) b	22,36 (0,6%)	171,36
T3	14,41 (-0,8%)	21,54 (-1,9%) ab	49,48	10,46 (49,4%) a	19,28 (-13,2%)	84,32
T4	14,95 (3,0%)	20,27 (-7,7%) ab	35,59	7,14 (2,0%) bc	23,84 (7,3%)	233,89
T5	15,43 (6,3%)	17,67 (-19,5%) b	14,52	9,79 (39,9%) a	20,78 (-6,5%)	112,26
T6	14,31 (-1,4%)	23,62 (7,6%) a	65,06	6,40 (-8,6%) c	25,14 (13,1%)	292,81
Pr>Fc	0,93 ^{ns}	0,22 ^{ns}	---	0	0,51 ^{ns}	---
Média	4,57	20,98	44,43	8,17	22,27	185,35
CV (%)	14,68	14,91	---	10,5	19,83	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores de K no solo não foram influenciados pelos tratamentos em nenhuma das socas avaliadas, indicando que a adubação mineral convencional e as doses do fertilizante organomineral não promoveram alterações estatisticamente detectáveis nesse nutriente (Tabela 10).

Para o S no solo (Tabela 10), houve efeito dos tratamentos pelo teste de Duncan a 5%. Na 1ª soca, todos os tratamentos adubados apresentaram teores superiores ao controle sem adubação, demonstrando que tanto a adubação mineral quanto o organomineral elevaram a disponibilidade de S no primeiro ciclo. Na 2ª soca, os maiores teores foram observados na adubação mineral e na dose de 75% do organomineral, enquanto a dose de 125% apresentou o menor teor. Esse resultado foi similar a Meneghetti *et al.* (2025), que observaram influência significativa do tipo de fertilização sobre o teor de S no solo, destacando que tratamentos com fertilizantes

contendo fração orgânica e mineral podem manter maior disponibilidade de macronutrientes após o ciclo de cultivo.

Tabela 10 - K e S do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	K			S		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	mmolc dm ⁻³		%	mmolc dm ⁻³		%
T1	5,20 (0,0%)	3,91 (0,0%)	-24,81	2,74 (0,0%) b	3,37 (0,0%) ab	22,99
T2	5,09 (-2,1%)	4,47 (14,1%)	-12,18	4,49 (63,9%) a	4,21 (25,0%) a	-6,24
T3	5,41 (4,0%)	4,23 (8,1%)	-21,81	4,36 (59,1%) a	2,94 (-12,9%) b	-32,57
T4	5,60 (7,7%)	3,80 (-3,0%)	-32,14	4,49 (63,9%) a	3,42 (1,3%) ab	-23,83
T5	5,35 (2,9%)	4,53 (15,8%)	-15,33	5,11 (86,5%) a	4,25 (26,0%) a	-16,83
T6	5,20 (0,0%)	4,33 (10,5%)	-16,73	5,20 (89,8%) a	3,55 (5,3%) ab	-31,73
Pr>Fc	0,78 ^{ns}	0,18 ^{ns}	---	0	0,15	---
Média	5,31	4,2114	-20,5	4,4	3,62	-14,7
CV (%)	9,8	10,63	---	12,41	20,45	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores de Ca e Mg do solo foram influenciados pelos tratamentos apenas na 1ª soca, evidenciando resposta inicial da fertilidade do solo à aplicação do fertilizante organomineral. Para o Ca, os tratamentos com 125%, 75% e 50% da dose recomendada via organomineral apresentaram os maiores teores, superando o controle sem adubação, enquanto a adubação mineral e a dose de 100% do organomineral apresentaram comportamento intermediário.

Para o Mg, a resposta na 1ª soca foi mais seletiva, com maior teor no tratamento 125% organomineral, seguido pela dose de 75%, enquanto o controle, a adubação mineral e a dose de 100% apresentaram os menores valores. Esse comportamento sugere que a resposta dos cátions básicos ao organomineral não foi linear. Na 2ª soca, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre Ca e Mg.

Tabela 11 - Ca e Mg do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	Ca			Mg		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	mmolc dm ⁻³		%	mmolc dm ⁻³		%
T1	34,52 (0,0%) b	31,13 (0,0%)	-9,82	12,03 (0,0%) c	22,50 (0,0%)	87,03
T2	40,69 (17,9%) ab	27,88 (-10,4%)	-31,48	11,12 (-7,6%) c	21,79 (-3,2%)	95,95
T3	43,98 (27,4%) a	30,02 (-3,6%)	-31,74	16,52 (37,3%) a	19,86 (-11,7%)	20,22
T4	41,01 (18,8%) ab	28,26 (-9,2%)	-31,09	12,14 (0,9%) c	19,39 (-13,8%)	59,72
T5	44,29 (28,3%) a	30,78 (-1,1%)	-30,5	14,80 (23,0%) ab	19,53 (-13,2%)	31,96
T6	43,83 (27,0%) a	35,36 (13,6%)	-19,32	12,58 (4,6%) bc	21,79 (-3,1%)	73,21
Pr>Fc	0,08	0,49 ^{ns}	---	0	0,59 ^{ns}	---
Média	41,39	30,57	-25,66	13,2	20,81	61,35
CV (%)	11,49	18,35	---	12,56	15,03	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor

A atividade da β -glicosidase e arilsulfatase não foi influenciada pelos tratamentos na 1ª soca, indicando que, no primeiro ciclo avaliado, a adubação mineral convencional e as doses do fertilizante organomineral não promoveram alterações detectáveis. Segundo Qu *et al.* (2023) a atividade dos microrganismos está fortemente relacionada com a temperatura média e períodos de secas, onde em altas temperaturas e estiagem afetam a identificação dos marcadores biológicos, o que pode responder os dados da 1ª soca. Na 2ª soca, entretanto, houve diferenciação da β -glicosidase entre tratamentos pelo teste de Duncan a 5%, com maior atividade no controle sem adubação e comportamento intermediário-superior na dose de 75% do organomineral. Os menores valores foram observados na adubação mineral convencional e na dose de 50% do organomineral, evidenciando ausência de resposta linear às doses.

Para arilsulfatase na 2ª soca a dose de 100% do organomineral apresentou a maior atividade enzimática, superando a adubação mineral convencional. Esse comportamento sugere que a associação entre fração mineral e matriz orgânica da cama de frango pode ter favorecido, no segundo ciclo, a atividade microbiana relacionada ao ciclo do enxofre. Em experimentos realizados por Lima *et al.* (2023) avaliando fertilizantes organominerais com e sem S em Latossolos, observaram que

as formulações organominerais alteraram a nutrição das plantas e a atividade biológica do solo.

Tabela 12 - B-glicosidase e Arilsulfatase do solo em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	B-glicosidase			Arilsulfatase		
	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª ≠ 2ª soca
	µg de PNF g ⁻¹ solo h ⁻¹		%	µg de p-nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹		%
T1	30,51	54,16 (0,0%) a	77,52	58,62	59,57 (0,0%) ab	1,62
T2	33,44	41,20 (-23,9%) c	23,21	39,7	46,64 (-21,7%) b	17,48
T3	32,5	43,01 (-20,6%) bc	32,34	57,78	59,46 (-0,2%) ab	2,91
T4	35,24	47,12 (-13,0%) ac	33,71	51,88	67,46 (13,2%) a	30,03
T5	28,21	50,78 (-6,2%) ab	80,01	43,39	58,38 (-2,0%) ab	34,55
T6	28,21	41,25 (-23,8%) c	46,22	50,32	56,18 (-5,7%) ab	11,65
Pr>Fc	0,37 ^{ns}	0.01	---	0,31 ^{ns}	0.13	---
Média	31,35	46,25	48,83	50,28	57,95	16,37
CV (%)	17,01	11,2	---	26,43	16,36	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação ao P-remanescente na 1ª e na 2ª socas, não houve diferença estatística entre os tratamentos (Tabela 13), indicando que as doses de fertilizante organomineral não alteraram de forma significativa a capacidade do solo em manter o fósforo em solução. Apesar disso, alguns comportamentos observados nas demais variáveis ajudam a compreender melhor a dinâmica do P ao longo dos ciclos, especialmente quando analisados em conjunto com o P-resina, a matéria orgânica e a acidez potencial do solo.

No caso do Tratamento 6, observou-se resposta pontual associada ao aumento do P lábil (Tabela 9), o que pode estar relacionado a múltiplos fatores, como a reaplicação do organomineral, a mineralização gradual da fração orgânica e a própria dinâmica de retenção e liberação do fósforo no solo. Assim, embora o P-remanescente não tenha diferido estatisticamente entre os tratamentos, esse comportamento contribui para explicar a maior disponibilidade de P observada no segundo ano de avaliação.

A matriz de correlação de Pearson evidenciou comportamento distinto entre a 1ª e a 2ª socas da cana-de-açúcar sob doses de fertilizante organomineral (Figura 6). Na 1ª soca, as correlações foram mais dispersas, sugerindo uma fase inicial de reorganização da fertilidade do solo após a aplicação do fertilizante. Nesse ciclo, a associação entre maior P foliar e menor matéria orgânica pode indicar uma etapa inicial de mineralização da fração orgânica, na qual parte do material aplicado foi decomposta, disponibilizando P para absorção pelas plantas.

Na 2ª soca, por outro lado, a relação entre P foliar e matéria orgânica tornou-se mais sincronizada, indicando que esses atributos passaram a variar de forma conjunta. Esse comportamento sugere maior estabilização da fração orgânica no solo e possível atuação da matéria orgânica como reservatório e reguladora da disponibilidade de P. Além disso, a interação entre H+Al com P-resina e matéria orgânica indica que a acidez potencial pode ter influenciado a dinâmica do fósforo, uma vez que ambientes com maior H+Al tendem a favorecer processos de adsorção e fixação de P, reduzindo sua disponibilidade para as plantas.

Esse comportamento é compatível com a literatura, pois aplicações sucessivas de resíduos orgânicos podem aumentar o conteúdo de matéria orgânica ao longo do tempo e reduzir a adsorção de P, elevando sua disponibilidade para as plantas (Haynes; Mokolobate, 2001). Em sistemas com adição prolongada de compostos orgânicos, Erich, Fitzgerald e Porter (2002) observaram maiores teores de P disponível, P dessorvível e carbono orgânico dissolvido em comparação a solos sem adição orgânica, indicando que a matéria orgânica pode regular a dinâmica do P de forma mais estável ao longo do tempo.

Entretanto, o comportamento do P-remanescente não seguiu integralmente esse padrão esperado, pois apresentou associação positiva com H+Al. Em termos teóricos, maiores valores de P-remanescente geralmente indicam menor capacidade de adsorção de fósforo pelo solo, como observado por Lisboa *et al.* (2012) e Eberhardt *et al.* (2008).

Tabela 13 - P-remanescente no solo da cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

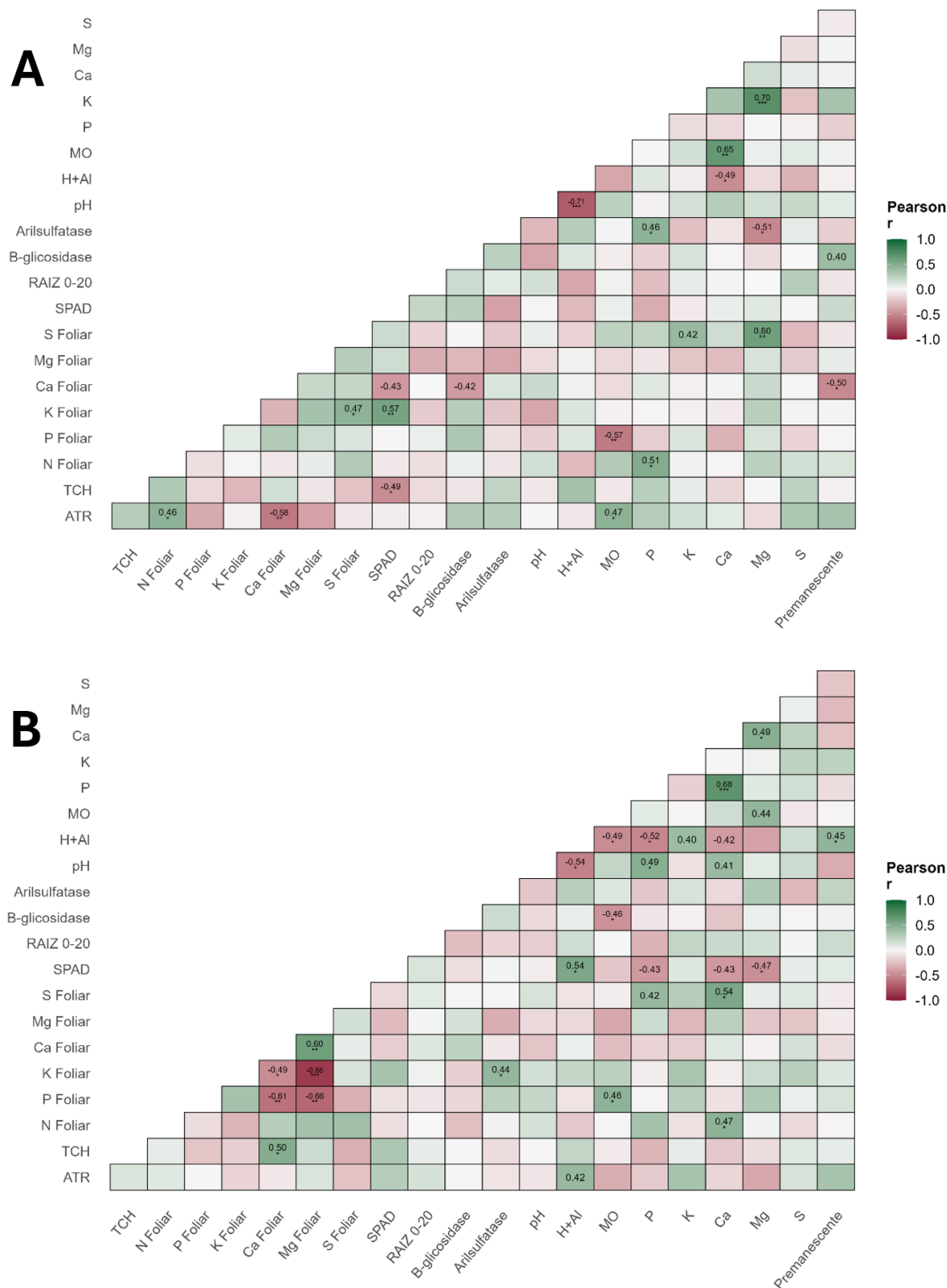
Tratamentos	P-remanescente		
	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca
	mg L ⁻¹		%
T1	4,95 (0,0%)	4,94 (0,0%)	-0,2
T2	5,00 (1,0%)	4,98 (0,8%)	-0,4
T3	5,11 (3,2%)	5,10 (3,2%)	-0,2
T4	5,06 (2,2%)	5,05 (2,2%)	-0,2
T5	5,04 (1,8%)	5,03 (1,8%)	-0,2
T6	5,89 (19,0%)	4,88 (-1,2%)	-17,15
Pr>Fc	0,96 ^{ns}	0,96 ^{ns}	---
Média	5,18	5	-3,06
CV (%)	7,08	7,35	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na 2ª soca, também foram observadas correlações negativas expressivas entre nutrientes foliares, principalmente entre K foliar × Mg foliar, P foliar × Mg foliar, P foliar × Ca foliar e K foliar × Ca foliar. Esse padrão indica possível antagonismo ou desbalanço nutricional, especialmente envolvendo K, Ca e Mg. Essa interpretação é sustentada por Rhodes, Miles e Hughes (2018), que demonstraram, em cana-de-açúcar, que o aumento da disponibilidade de K pode reduzir a absorção foliar de Ca e Mg.

As enzimas β-glicosidase e arilsulfatase não apresentaram correlação forte e direta com TCH ou ATR nos dois ciclos avaliados. Isso indica que, neste conjunto de dados, a atividade enzimática não foi o principal fator linear associado à produtividade ou à qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Entretanto, a ausência de correlação direta não significa ausência de efeito biológico. Purcena *et al.* (2014) destacam que enzimas do solo respondem ao manejo e estão relacionadas à ciclagem de nutrientes, atuando mais como indicadores da qualidade biológica do solo do que como variáveis diretamente proporcionais à produtividade.

Figura 6 - Matriz de correlação de Pearson: produtividade, atributos tecnológicos, estado nutricional foliar, atividade enzimática e atributos químicos do solo em cana-de-açúcar sob doses de fertilizante organomineral na 1ª soca (A) e na 2ª soca (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Atributos tecnológicos da cana

Os tratamentos não influenciaram significativamente os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar no primeiro ano experimental. No entanto, no segundo ano, houve efeito significativo dos tratamentos para a maioria das variáveis avaliadas, com exceção do ATR por hectare e dos açúcares redutores (AR), conforme apresentado nas Tabelas 14, 15 e 16. Esse comportamento indica que a resposta tecnológica da cultura foi mais evidente na segunda soca, possivelmente em função da interação entre reaplicação dos fertilizantes, efeito residual do manejo anterior e condições ambientais observadas ao final do ciclo.

No segundo ano, o tratamento com 50% da dose de organomineral apresentou o menor desempenho tecnológico, com menores valores de ATR kg t⁻¹, Brix e Pol, além de maior teor de fibra. Esse resultado sugere menor acúmulo relativo de açúcares recuperáveis na matéria-prima, uma vez que Brix e Pol estão associados à concentração de sólidos solúveis e sacarose, enquanto a fibra representa a fração estrutural insolúvel do colmo. Essa interpretação é coerente com Viana *et al.* (2017), que observaram efeito positivo de Brix e Pol sobre o açúcar total recuperável, enquanto a fibra apresentou efeito negativo sobre essa variável. Assim, o maior teor de fibra no tratamento com 50% de organomineral ajuda a explicar os menores valores de ATR kg t⁻¹, Brix e Pol.

Tabela 14 - ATR kg t e t ha em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	ATR			ATR		
	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca
	kg t ⁻¹		%	t ha ⁻¹		%
T1	135,57 (0,0%)	126,79 (0,0%) ab	-6,47	17,13 (0,0%)	13,46 (0,0%)	-21,42
T2	129,45 (-4,5%)	132,36 (4,4%) a	2,25	17,21 (0,5%)	12,57 (-6,6%)	-26,96
T3	132,69 (-2,1%)	131,72 (3,9%) a	-0,73	16,99 (-0,8%)	14,45 (7,4%)	-14,95
T4	133,43 (-1,6%)	127,99 (0,9%) ab	-4,08	19,10 (11,5%)	13,38 (-0,6%)	-29,95
T5	132,46 (-2,3%)	130,99 (3,3%) ab	-1,11	18,04 (5,3%)	13,55 (0,7%)	-24,89
T6	130,18 (-5,59%)	122,90 (-3,1%) b	-5,59	17,43 (1,8%)	14,04 (4,3%)	-19,45
Pr>Fc	0,93 ^{ns}	0,14	---	0,61 ^{ns}	0,65 ^{ns}	---
Média	132,3	128,79	-2,62	17,65	13,58	-22,94
CV (%)	6,71	4,01	---	10,62	11,54	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - AR e POL em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	AR			Pol		
	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca
	%			%		
T1	0,72 (0,0%)	0,72 (0,0%)	0	15,90 (0,0%)	15,17 (0,0%) ab	-4,61
T2	0,77 (6,9%)	0,84 (17,4%)	9,09	15,08 (-5,2%)	15,67 (3,3%) ab	3,93
T3	0,73 (1,4%)	0,69 (-4,2%)	-5,48	15,57 (-2,1%)	15,71 (3,6%) a	0,92
T4	0,72 (0,0%)	0,72 (0,0%)	0	15,88 (-0,1%)	15,18 (0,1%) ab	-4,39
T5	0,75 (4,2%)	0,68 (-5,2%)	-9,33	15,57 (-2,1%)	15,43 (1,7%) ab	-0,88
T6	0,75 (4,2%)	0,77 (6,6%)	2,67	15,35 (-3,5%)	14,70 (-3,1%) b	-4,23
Pr>Fc	0,94 ^{ns}	0,48 ^{ns}	---	0,92 ^{ns}	0,22	---
Média	0,74	0,74	-0,51	15,56	15,31	-1,55
CV (%)	11,09	16,93	---	7,74	3,89	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela16 - Fibra e Brix em cana-de-açúcar (cultivar RB975201) adubada com fertilizante organomineral, em dois anos agrícolas (2023/24 e 2024/2025).

Tratamentos	Fibra			BRIX		
	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca	1ª soca	2ª soca	1ª soca ≠ 2ª soca
	%			%		
T1	9,60 (0,0%)	10,86 (0,0%) ab	13,13	18,49 (0,0%)	17,82 (0,0%) ab	-3,64
T2	9,45 (-1,6%)	10,61 (-2,3%) ab	12,22	17,95 (-2,9%)	19,27 (8,1%) a	7,34
T3	9,67 (0,7%)	10,51 (-3,3%) ab	8,63	18,29 (-1,1%)	18,24 (2,4%) ab	-0,29
T4	10,41 (8,4%)	10,36 (-4,6%) ab	-0,48	18,65 (0,9%)	17,81 (0,0%) ab	-4,5
T5	9,89 (3,0%)	9,81 (-9,7%) b	-0,81	18,33 (-0,9%)	17,88 (0,4%) ab	-2,44
T6	10,12 (5,4%)	11,09 (2,1%) a	9,61	18,22 (-1,5%)	17,60 (-1,2%) b	-3,4
Pr>Fc	0,46 ^{ns}	0,3	---	0,95 ^{ns}	0,22	---
Média	9,85	10,54	7,05	18,32	18,1	-1,16
CV (%)	7,32	7,24	---	5,6	5,33	---

Letras distintas na coluna, indicam diferença entre os tratamentos pelo teste de Duncan a 5% e ns: não significativo. Fonte: Elaborado pelo autor.

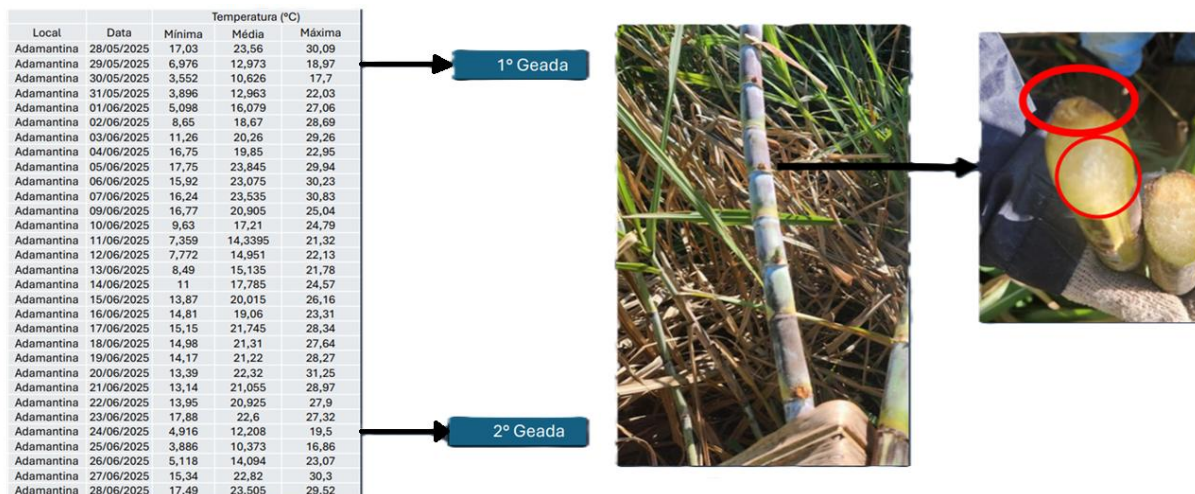
Por outro lado, os tratamentos com adubação mineral e com 125% da dose de organomineral apresentaram os maiores valores de ATR kg t⁻¹. Para Pol, o maior valor foi observado na dose de 125% de organomineral, enquanto o maior Brix ocorreu no tratamento com 100% de adubação mineral. Esses resultados indicam que a resposta tecnológica não foi linear em função das doses de organomineral, sugerindo que o desempenho da cana depende não apenas da quantidade aplicada, mas também do equilíbrio entre nutrição, produtividade agrícola e maturação dos colmos.

Apesar de o tratamento mineral ter apresentado maior ATR kg t⁻¹, esse desempenho não resultou no maior ATR por hectare. Isso ocorre porque o ATR por área depende não apenas da concentração de açúcares recuperáveis na matéria-prima, mas também da produtividade de colmos. Dessa forma, mesmo com maior qualidade tecnológica por tonelada de cana, a menor produtividade agrícola pode limitar o rendimento final de açúcar por hectare. No presente estudo, essa resposta pode estar relacionada aos estresses observados ao final do ciclo, incluindo a ocorrência de baixas temperaturas/geada, que podem ter afetado a integridade dos colmos e a qualidade industrial da matéria-prima.

A literatura demonstra que eventos de baixa temperatura podem acelerar a deterioração do caldo e afetar atributos como Brix, Pol e teor de sacarose da cana-de-açúcar (Edmé; Glaz, 2013). Além disso, a ocorrência de isoporização pode comprometer a qualidade tecnológica dos colmos, pois esse processo está associado

à desidratação e morte de tecidos internos, aumento da fração fibrosa e redução da qualidade da matéria-prima Figura 7. Silva Neto *et al.* (2011) observaram que a isoporização pode elevar os teores de fibra, açúcares redutores e acidez, especialmente quando a área isoporizada ultrapassa 50% do diâmetro do colmo.

Figura 7 - Efeito da geada durante o 2 ano experimental, podridão da gema lateral e isoporização causada pela morte apical.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse contexto, o tratamento com 75% da dose de organomineral apresentou maior estabilidade do rendimento tecnológico por área, mesmo sob condições adversas ao final do ciclo. Tal comportamento pode estar associado ao melhor equilíbrio entre produtividade agrícola e qualidade tecnológica da cana.

Estudos com fertilizantes organominerais em cana-de-açúcar demonstram que os efeitos sobre os atributos tecnológicos nem sempre são expressivos ou consistentes entre ciclos. Gonçalves *et al.* (2021), avaliando organominerais, observaram que o desempenho tecnológico da cana pode ser semelhante ao da adubação mineral, dependendo da fonte, dose e ciclo avaliado. De forma semelhante, Ramos *et al.* (2017) verificaram que a aplicação de cama de frango, composto organomineral e fertilizante mineral não alterou de maneira consistente as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar, resultado semelhante ao observado no primeiro ano experimental deste estudo.

Por fim, a maior estabilidade observada em determinados tratamentos com organomineral pode estar relacionada, de forma indireta, aos efeitos da fração orgânica do fertilizante sobre o sistema solo-planta. Revisões recentes indicam que

substâncias húmicas podem atuar como moduladoras de respostas vegetais a estresses abióticos, por meio de alterações no crescimento radicular, atividade de H⁺-ATPase, sinalização redox, balanço hormonal, cálcio citosólico e ativação de fatores de transcrição associados à tolerância ao estresse (Canellas *et al.*, 2024). No entanto, essa hipótese deve ser interpretada com cautela, pois não foram avaliados diretamente indicadores fisiológicos de tolerância ao frio, como atividade antioxidante, prolina, extravasamento de eletrólitos ou intensidade de dano por geada.

6 CONCLUSÃO

O fertilizante organomineral apresentou desempenho agronômico em relação à adubação mineral convencional na 1ª e na 2ª socas da cana-de-açúcar. A produtividade de colmos não diferiu entre os tratamentos na 1ª soca e na produção acumulada; entretanto, na 2ª soca, a dose de 75% do organomineral equivalente a 75 de N, 30 de P_2O_5 e 90 de K_2O por $kg\ ha^{-1}$ destacou-se em relação ao controle sem adubação, indicando possibilidade de redução parcial da dose recomendada sem prejuízo produtivo.

Os tratamentos influenciaram o índice SPAD, a densidade radicular, os teores foliares de alguns nutrientes e atributos químicos do solo, porém as respostas não ocorreram de forma linear em função das doses. A densidade radicular apresentou maior variação entre os tratamentos na 2ª soca, sugerindo efeito conjunto do residual da aplicação anterior, do ambiente e da idade fisiológica da soqueira.

Os atributos enzimáticos do solo apresentaram resposta variável entre tratamentos e ciclos, já no segundo ano experimental, a matéria orgânica, fosforo e a β -glicosidase apresentaram relações diretas e indiretas. Da mesma forma, os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar foram mais influenciados na 2ª soca.

Assim, a hipótese do trabalho foi confirmada, pois o fertilizante organomineral apresentou potencial de uso na adubação de soqueira da cana-de-açúcar, especialmente na dose de 75% da recomendação, mantendo desempenho produtivo competitivo. Estudos por mais ciclos são recomendados para confirmar o efeito residual e a estabilidade da resposta agronômica.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W. de *et al.* Growth and yield of sugarcane as a function of phosphorus doses and forms of application. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 29-35, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p29-35.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 27-32, jan./mar. 2000.
- ARNHOLD, E. Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, v. 50, n. 6, p. 488-492, 2013. DOI: 10.11606/issn.1678-4456.v50i6p488-492.
- ARRUDA, B. *et al.* The impact of sugarcane filter cake on the availability of P in the rhizosphere and associated microbial community structure. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 35, n. 2, p. 334-345, 2019. DOI: 10.1111/sum.12484.
- BARBOSA, M. F.; SALES, R. M. M.; GALARZA, F. A. D.; KRUGER, C. Q.; FÁVARO, L. C. L.; QUIRINO, B. F. Biological resources driving productivity: bioinputs for sustainable plant agriculture in Brazil. **Sustainable Microbiology**, v. 2, n. 3, qvaf011, 2025. DOI: 10.1093/sumbio/qvaf011.
- BARBOSA, N. S.; LUZ, M. S. da; SOUSA, N. G.; SANTOS, K. G. Development and evaluation of slow-release organomineral phosphate fertilizer based on coffee waste. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 48, e018323, 2024. DOI: 10.1590/1413-7054202448018323.
- BENÍCIO, L. P. Overview of the use of phosphate fertilizers in Brazil, a review. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas, v. 8, edição especial, e022008, 2022. DOI: 10.36725/agries.v8i2.7761.
- BENITES, V. de M. *et al.* Organomineral fertilizer is an agronomic efficient alternative for poultry litter phosphorus recycling in an acidic Ferralsol. **Frontiers in Agronomy**, v. 4, art. 785753, 2022. DOI: 10.3389/fagro.2022.785753.
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA JUNIOR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, art. 13, 2018. DOI: 10.1007/s13593-018-0490-x.
- BORGES, B. M. M. N. *et al.* Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. **Geoderma**, v. 339, p. 20-30, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.12.036.
- BOUHIA, Y.; HAFDI, M.; OUHDOUCH, Y.; EL BOUKHARI, M. E. M.; MPHATSO, C.; ZEROUAL, Y.; LYAMLOULI, K. Conversion of waste into organo-mineral fertilizers: current technological trends and prospects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, p. 425-446, 2022. DOI: 10.1007/s11157-022-09619-y.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil*. Brasília, DF: MAPA, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 15 jul. 2020.

BRINKMAN, M. L. J.; CUNHA, M. P. da; HEIJNEN, S.; WICKE, B.; GUILHOTO, J. J. M.; WALTER, A.; FAAIJ, A. P. C.; HILST, F. van der. Interregional assessment of socio-economic effects of sugarcane ethanol production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 347-362, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.02.014.

CANELLAS, L. P. *et al.* Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 130, n. 4, p. 1951-1957, 2002. DOI: 10.1104/pp.007088.

CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 1, art. 3, 2014. DOI: 10.1186/2196-5641-1-3.

CANELLAS, L. P.; SILVA, R. M. da; BUSATO, J. G.; OLIVARES, F. L. Humic substances and plant abiotic stress adaptation. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 11, art. 66, 2024. DOI: 10.1186/s40538-024-00575-Z.

CHOJNACKA, K. Global adoption of organo-mineral fertilisers: environmental and policy insights. **Discover Agriculture**, v. 3, art. 184, 2025. DOI: 10.1007/s44279-025-00349-7.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar: safra 2026/27: primeiro levantamento. Brasília, DF: Conab, 2026.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Organomineral fertilizer as source of P and K for sugarcane. **Scientific Reports**, v. 10, art. 5398, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-62315-1.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. de F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1009-1016, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000300010.

EDMÉ, S. J.; GLAZ, B. S. Field response of sugarcane genotypes to freeze stress with genotype × environment effects on quality traits. **Journal of Crop Improvement**, v. 27, n. 1, p. 1-30, 2013.

ERICH, M. S.; FITZGERALD, C. B.; PORTER, G. A. The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. **Agriculture**,

Ecosystems & Environment, v. 88, n. 1, p. 79-88, 2002. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00147-5.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Estado nutricional da cultura de cana-de-açúcar (cana-planta) em experimentos com ^{15}N . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1919-1927, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000600041.

FRAZÃO, J. J. *et al.* Agronomic effectiveness of a granular poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer in tropical soils: soil phosphorus fractionation and plant responses. **Geoderma**, v. 337, p. 582-593, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.10.003.

GOMES, N. C. de B. *et al.* Ash-based organomineral fertilizer improves soil chemical quality and forage yield of *Urochloa brizantha*. **Australian Journal of Crop Science**, v. 19, n. 10, p. 1041-1049, 2025. DOI: 10.21475/ajcs.25.19.10.p63.

GONÇALVES, C. A. *et al.* Chemical and technological attributes of sugarcane as functions of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge as organic matter sources. **PLOS ONE**, v. 16, n. 12, e0236852, 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0236852.

GURGEL, M. N. do A. *et al.* Technology for sugarcane agroindustry waste reuse as granulated organomineral fertilizer. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 63-75, 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p63-75/2015.

HARRELL JUNIOR, F. E. *Hmisc: Harrell Miscellaneous*. R package version 5.2-5. 2026. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>. Acesso em: 10 abr. 2026.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 59, p. 47-63, 2001. DOI: 10.1023/A:1009823600950.

HIDALGO, D.; MARTÍN-MARROQUÍN, J. M.; CORONA, F.; VERDUGO, F. Waste-derived fertilizers: conversion technologies, circular bioeconomy perspectives and agronomic value. **Agronomy**, v. 15, n. 9, art. 2167, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15092167.

JINDO, K. *et al.* From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, art. 426, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00426.

LAFORÉ, M. R. C. A transferência de tecnologia de processos de produção de fertilizantes organominerais: pesquisa-ação sobre uma parceria público-privada. 2013. 194 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual e Inovação) – **Instituto Nacional da Propriedade Industrial**, Rio de Janeiro, 2013.

LIMA, J. C. de. Adubação mineral, organomineral e orgânica associadas ao enxofre na cultura do milho e sua influência nos atributos químicos e biológicos do solo.

2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – **Universidade Estadual do Oeste do Paraná**, Marechal Cândido Rondon, 2023.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; ABICHEQUER, A. D.; DORNELES, E. P.; CAPITANI, B. Determinação do fósforo remanescente como método alternativo à textura na indicação da classe de disponibilidade de fósforo em três solos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 81-84, 2012.

MAGELA, M. L. M. *et al.* Application of organomineral fertilizers sourced from filter cake and sewage sludge can affect nutrients and heavy metals in soil during early development of maize. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 6, p. 863-873, 2019. DOI: 10.21475/ajcs.19.13.06.p1538.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: **POTAFOS**, 1997. 319 p.

MELO, A. de S.; SAMPAIO, Y. de S. B. Uma nota sobre o impacto do preço do açúcar, do etanol e da gasolina na produção do setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 70, n. 1, p. 61-69, jan./mar. 2016. DOI: 10.5935/0034-7140.20160004.

MENDES, I. de C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, O. D. D. da; OLIVEIRA, M. I.; MALAQUIAS, J. V. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2021. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 369).

MENEGHETTI, L. A. M. *et al.* Effects of organic, organomineral, and mineral fertilization on soil macronutrients in chrysanthemum cultivar Singelo cultivation. **Horticulturae**, v. 11, n. 6, art. 567, 2025. DOI: 10.3390/horticulturae11060567.

MJANJA, B. E.; SHITINDI, M. J.; MASSAWE, B. H.; MULASHANI, G. R. Driving sustainability in tea farming: insights on organo-mineral fertilizers. **Frontiers in Soil Science**, v. 5, art. 1629846, 2025. DOI: 10.3389/fsoil.2025.1629846.

MOMMER, L.; VISSER, E. J. W. Root distribution in soils I: root core sampling and destructive pot harvests. In: MANCUSO, S. (ed.). *Measuring roots: an updated approach*. Berlin: **Springer**, 2012. p. 165-178.

MORAES, E. R. de *et al.* Yield and biometry of fertilized sugar cane with organomineral fertilizer of sewage sludge and biostimulant. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 36, n. 5, p. 1564-1576, 2020. DOI: 10.14393/BJ-v36n5a2020-42189.

MORAIS, J. E. de F. de *et al.* Nutritional status, Na⁺ and Cl⁻ concentrations, and yield of sugarcane irrigated with brackish waters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 26, n. 11, p. 863-874, 2022. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p863-874.

MOREIRA, J. G. *et al.* Chemical changes in soil with use of pelletized organomineral fertilizer made from biosolids and sugarcane filter cake. **Australian Journal of Crop Science**, v. 15, n. 1, p. 67-72, 2021. DOI: 10.21475/ajcs.21.15.01.2645.

MOTA, R. P. da *et al.* Biosolid and sugarcane filter cake in the composition of organomineral fertilizer on soybean responses. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, p. 131-137, 2019. DOI: 10.1007/s40093-018-0237-3.

NAGASAWA, K. *et al.* Effects of humic acids derived from lignite and cattle manure on antioxidant enzymatic activities of barley root. **Journal of Environmental Science and Health, Part B, Philadelphia**, v. 51, n. 2, p. 81-89, 2016. DOI: 10.1080/03601234.2015.1080516.

OECD; FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034**. OECD Publishing, 2025. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_601276cd-en.html>. Acesso em: 23 abr. 2026.

OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **BioEnergy Research**, v. 9, p. 1272-1289, 2016. DOI: 10.1007/s12155-016-9763-x.

PEREIRA, L. A. C.; CARDOSO, V. M. Qual é a dependência do agro brasileiro das importações de fertilizantes? **Agro in Data**, Insper Agro Global, 7 ago. 2025. Disponível em: <<https://agro.insper.edu.br/agro-in-data/artigos/qual-e-a-dependencia-do-agro-brasileiro-das-importacoes-de-fertilizantes>>. Acesso em: 25 abr. 2026.

PURCENA, L. L. A.; DI MEDEIROS, M. C. B.; LEANDRO, W. M.; FERNANDES, K. F. Effects of organic and conventional management of sugar cane crop on soil physicochemical characteristics and phosphomonoesterase activity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, p. 1456-1463, 2014. DOI: 10.1021/jf403141w.

QU, Q. *et al.* Impact of drought on soil microbial biomass and extracellular enzyme activity. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, art. 1221288, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1221288.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: **Instituto Agrônômico**, 2001. 285 p.

RAMOS, L. A. Cama de frango e organomineral na cultura da cana-de-açúcar. 2013. 58 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2013.

RAMOS, L. A. *et al.* Effect of organo-mineral fertilizer and poultry litter waste on sugarcane yield and some plant and soil chemical properties. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 1, p. 20-27, 2017. DOI: 10.5897/AJAR2016.11024.

R CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 4 maio. 2026.

RHODES, R.; MILES, N.; HUGHES, J. C. Interactions between potassium, calcium and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soils in South Africa. **Field Crops Research**, v. 223, p. 1-11, 2018. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.01.001.

RODRIGUES, M. M. *et al.* Sewage sludge as organic matrix in the manufacture of organomineral fertilizers: physical forms, environmental risks, and nutrients recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, art. 127774, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127774.

SANTOS, H. G. dos *et al.* Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. 356 p.

SCHÖBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763-1768, 2018. DOI: 10.1213/ANE.0000000000002864.

SHAH, Z. H. *et al.* Humic substances: determining potential molecular regulatory processes in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 263, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.00263.

SILVA, V. de P. *et al.* Modelagem para otimização da calagem e adubação na cultura de cana-de-açúcar. Planaltina, DF: **Embrapa** Cerrados, 2022. 29 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 368).

SILVA NETO, H. F. da *et al.* Influência do florescimento e grau de isoporização na qualidade de variedades de cana-de-açúcar aptas à industrialização no meio de safra. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 1-7, 2011.

SKALSKI, E. What drives urea price fluctuations? Rennes: **University of Rennes, CREM**, 2025. Discussion paper.

SOARES, M. Y.; RAMOS, D. S.; PAVAN, M. de O.; DIUANA, F. A. Barriers to the expansion of sugarcane bioelectricity in Brazilian energy transition. **Energies**, v. 16, n. 2, art. 955, 2023. DOI: 10.3390/en16020955.

SOLANGI, F. *et al.* The global dilemma of soil legacy phosphorus and its improvement strategies under recent changes in agro-ecosystem sustainability. **ACS Omega**, v. 8, n. 26, p. 23271-23282, 2023. DOI: 10.1021/acsomega.3c00823.

TEIXEIRA, W. G. Biodisponibilidade de fósforo e potássio provenientes de fertilizantes mineral e organomineral. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2013.

TEODORO, D. L. da C.; ROCHA, S. M. da; BENÍCIO, L. P. F. Toward agricultural resilience: analyzing Brazil's National Fertilizer Plan. **Science, Technology & Public Policy**, v. 8, n. 1, p. 9-14, 2024. DOI: 10.11648/j.stpp.20240801.12.

TITO, G. A. *et al.* Carbon and nitrogen mineralization in soil amended with biochar and poultry manure. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 34, n. 4, p. 896-905, 2021. DOI: 10.1590/1983-21252021v34n417rc.

UDDIN, M. K.; SAHA, B. K.; WONG, V. N. L.; PATTI, A. F. Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: a comprehensive review. **European Journal of Agronomy**, v. 162, art. 127433, 2025. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127433.

UDDLING, J.; GELANG-ALFREDSSON, J.; PIIKKI, K.; PLEIJEL, H. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 91, p. 37-46, 2007. DOI: 10.1007/s11120-006-9077-5.

VALVERDE-VOZMEDIANO, L. *et al.* Looking for new P fertilizers: comparative study of mineral-, organomineral- and organic-based fertilizers for lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Agronomy**, v. 15, n. 7, art. 1661, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15071661.

VASANTHA, S.; SHEKINAH, D. E.; GUPTA, C. T. Tiller production, mortality and their relationship with yield in sugarcane genotypes. **Journal of Sugarcane Research**, v. 2, n. 2, p. 30-34, 2012.

VIANA, R. da S. *et al.* Quality of sugarcane juice in intercropping and monoculture systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 10, p. 719-724, 2017. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p719-724.

WICKHAM, H. ggplot2: elegant graphics for data analysis. New York: **Springer**, 2016.

ZHANG, C. *et al.* Genetic control of photosynthesis in sugarcane during successive ratoon cycles. **Biology**, Basel, v. 15, n. 1, art. 75, 2026. DOI: 10.3390/biology15010075.