

RESÍDUOS DO NORTE FLUMINENSE NA PRODUÇÃO DO ABACAXIZEIRO
'IMPERIAL'

ALEX PAULO MARTINS DO CARMO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2026

RESÍDUOS DO NORTE FLUMINENSE NA PRODUÇÃO DO ABACAXIZEIRO
'IMPERIAL'

ALEX PAULO MARTINS DO CARMO

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal”.

Orientadora: Profa. Dra. Marta Simone Mendonça Freitas

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF – Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor

C287

Carmo, Alex Paulo Martins do.

RESÍDUOS DO NORTE FLUMINENSE NA PRODUÇÃO DO ABACAXIZEIRO
'IMPERIAL' / Alex

Paulo Martins do Carmo. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

123 f.

Bibliografia: 97 - 111.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2026.

Orientadora: Marta Simone Mendonça Freitas.

1. *Ananas comosus* (L.) Merr.. 2. Agricultura sustentável. 3. Bioinsumos. 4. Nutrição vegetal.
5. Microbiologia do solo. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

II. Título.

CDD - 630

RESÍDUOS DO NORTE FLUMINENSE NA PRODUÇÃO DO ABACAXIZEIRO 'IMPERIAL'

ALEX PAULO MARTINS DO CARMO

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal”.

Aprovada em 24 de fevereiro de 2026

Comissão Examinadora: Documento assinado digitalmente
 **ALMY JUNIOR CORDEIRO DE CARVALHO**
Data: 22/05/2026 18:30:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Almy Junior Cordeiro de Carvalho (D. Sc. Produção Vegetal) – UENF

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL RAMATIS PUGLIESE ANDRADE**
Data: 20/05/2026 23:47:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Ramatis Pugliese Andrade (D. Sc. Solos e Nutrição de Plantas) -
UENF

Documento assinado digitalmente
 **PAULO CESAR DOS SANTOS**
Data: 22/05/2026 09:15:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Cesar dos Santos (D. Sc. Produção Vegetal) – UFES

Documento assinado digitalmente
 **MARTA SIMONE MENDONÇA FREITAS**
Data: 22/05/2026 18:27:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Marta Simone Mendonça Freitas (D. Sc. Produção Vegetal) -UENF
Orientadora

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e força concedidas ao longo desta caminhada.

À minha família, em especial à minha mãe, Nilma Lopes Martins, e ao meu pai, Raimundo Nonato Conceição do Carmo, pelo amor, apoio e incentivo constantes, fundamentais para a realização deste trabalho e para minha trajetória acadêmica;

À minha parceira, Raudielle dos Santos, pelo amor, companheirismo, incentivo e apoio em todas as etapas desta trajetória;

À minha orientadora, Profa. Dra. Marta Simone Mendonça Freitas, pela dedicação, confiança e valiosas contribuições durante o desenvolvimento desta pesquisa;

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de realização desta pós-graduação e pelo suporte acadêmico ao longo desta jornada;

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) – Brasil – código de financiamento 001, pela concessão da bolsa e pelo apoio financeiro por meio do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE 88881.981051/2024-01), bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, pelo fomento à pesquisa, essenciais para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Julián Cuevas González, ao Dr. Fernando Chiamolera e ao grupo AGR-222 (Fruticultura Subtropical y Mediterránea), da Universidad de Almería, pela receptividade e pelas valiosas contribuições científicas durante o estágio realizado no exterior;

Aos colegas de laboratório, em especial David, Júlia, João, Luan, Ana Paula, Joseph, Yves e Detony, pela parceria, colaboração e apoio ao longo desta trajetória;

Aos amigos que o beach tennis me proporcionou, em especial Roger, Daniela, Saullo e Karina, pela amizade e pelos momentos de alegria que tornaram esta caminhada mais leve;

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. A cultura do abacaxizeiro	2
2.2. Nutrição do abacaxizeiro	4
2.3. Resíduos sólidos na região Norte Fluminense	6
2.3.1 Composto de lodo de ETE	7
2.3.2. Torta de filtro.....	7
2.3.3. Resíduo da produção de ácido lático.....	8
3. TRABALHOS.....	9
3.1. TORTA DE FILTRO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA FERTILIDADE E MICROBIOTA DO SUBSTRATO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO ABACAXIZEIRO ‘IMPERIAL’	9
3.2. COMPOSTO DE LODO DE ETE NA FERTILIDADE E MICROBIOTA DO SUBSTRATO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO ABACAXIZEIRO ‘IMPERIAL’	42
3.3. RESÍDUO DE ÁCIDO LÁTICO NA FERTILIDADE E MICROBIOTA DO SUBSTRATO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO ABACAXIZEIRO ‘IMPERIAL’	70
4. CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE	112

RESUMO

CARMO, Alex Paulo Martins do; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Fevereiro de 2026; Resíduos do Norte Fluminense na produção do abacaxizeiro 'Imperial'; Orientadora: D.Sc. Marta Simone Mendonça Freitas.

O abacaxizeiro é uma cultura de elevada importância econômica para a região Norte Fluminense, caracterizada por alta exigência nutricional e forte dependência do uso de fertilizantes minerais. Paralelamente, a região apresenta expressiva geração de resíduos agroindustriais, cujo aproveitamento agrícola pode representar uma alternativa sustentável para o manejo da fertilidade do solo. Nesse contexto, esta tese teve como objetivo avaliar o potencial agrônômico da torta de filtro da cana-de-açúcar, do composto de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) e do resíduo da produção de ácido láctico, aplicados isoladamente, sobre a fertilidade e a microbiota do substrato, o crescimento e a nutrição do abacaxizeiro 'BRS Imperial'. Foram conduzidos três experimentos independentes, em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, com doses crescentes de cada resíduo e um tratamento adicional com adubação mineral convencional. Aos 220 dias após o plantio, foram avaliados atributos químicos e microbiológicos do substrato, variáveis de crescimento vegetal e teores nutricionais na folha "D". De modo geral, os resíduos promoveram melhorias específicas na fertilidade do substrato, destacando-se a torta de filtro, que apresentou respostas mais consistentes em doses entre 20 e 40 t ha⁻¹, com incremento da disponibilidade de fósforo, cálcio, matéria orgânica e crescimento vegetal, embora doses mais elevadas tenham afetado negativamente a população microbiana. O composto de lodo de ETE promoveu melhoria da fertilidade do substrato, manutenção da microbiota e nutrição adequada das plantas, com melhor desempenho nas doses entre 5 e 10 t ha⁻¹. O resíduo da produção de ácido láctico atuou principalmente como fonte de cálcio e enxofre, com respostas mais equilibradas observadas nas doses de 8 e 12 t ha⁻¹, porém com efeito limitado sobre o crescimento vegetal quando utilizado de forma isolada. Nenhum dos resíduos foi capaz de suprir integralmente as exigências nutricionais do abacaxizeiro, indicando a necessidade de complementação mineral, especialmente com nitrogênio (N) e potássio (K). Os resultados evidenciam que os resíduos agroindustriais avaliados apresentam potencial para uso agrícola como insumos complementares, contribuindo para o manejo sustentável da fertilidade e da nutrição do abacaxizeiro 'BRS Imperial'.

ABSTRACT

CARMO, Alex Paulo Martins do; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; February 2026; Residues from Northern Fluminense in the production of 'Imperial' pineapple; Adviser: D.Sc. Marta Simone Mendonça Freitas.

Pineapple is a crop of high economic importance in the Norte Fluminense region, characterized by high nutritional demand and strong dependence on mineral fertilizers. At the same time, the region generates large amounts of agro-industrial residues, whose agricultural use may represent a sustainable alternative for soil fertility management. In this context, this thesis aimed to evaluate the agronomic potential of sugarcane filter cake, sewage treatment plant sludge compost and lactic acid production residue, applied individually, on substrate fertility and microbiota, plant growth, and nutritional status of 'BRS Imperial' pineapple. Three independent greenhouse experiments were conducted in a randomized block design, using increasing doses of each residue and an additional treatment with conventional mineral fertilization. At 220 days after planting, chemical and microbiological attributes of the substrate, plant growth variables, and nutrient contents in the "D" leaf were evaluated. Overall, the residues promoted specific improvements in substrate fertility. Sugarcane filter cake showed the most consistent responses at doses between 20 and 40 t ha⁻¹, increasing phosphorus and calcium availability, organic matter content, and vegetative growth, although higher doses negatively affected microbial populations. STS compost improved substrate fertility, maintained microbial populations, and ensured adequate plant nutrition, with better performance at doses between 5 and 10 t ha⁻¹. Lactic acid production residue acted mainly as a source of calcium and sulfur, with more balanced responses observed at doses of 8 and 12 t ha⁻¹ but showed limited effects on plant growth when applied alone. None of the evaluated residues were able to fully meet the nutritional requirements of pineapple, indicating the need for mineral supplementation, especially with nitrogen and potassium. These results demonstrate that the evaluated agro-industrial residues have potential for agricultural use as complementary inputs, contributing to sustainable management of soil fertility and pineapple nutrition.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por atividades agrícolas sustentáveis tem impulsionado o estudo de alternativas aos fertilizantes de origem química e de fonte finita, a partir do aproveitamento de subprodutos agroindustriais. Essa mudança de conceitos na agricultura está associada à crescente preocupação com a conservação dos recursos naturais, uma vez que resíduos de origem industrial, quando mal destinados, tornam-se fontes relevantes de poluição ambiental, com impactos ao meio ambiente e à saúde humana.

Em 2024, a cadeia produtiva do abacaxi no Brasil ocupou uma área colhida de 56.955 ha, resultando em uma produção superior a 2,3 milhões de toneladas, o que manteve o país na quarta posição entre os maiores produtores mundiais da cultura (IBGE, 2024, FAOSTAT, 2024). Nesse contexto, o estado do Rio de Janeiro respondeu por aproximadamente 9% da produção nacional, com cerca de 5.000 ha colhidos. No Norte Fluminense, a produção mostrou-se fortemente concentrada, destacando-se os municípios de São Francisco do Itabapoana e Campos dos Goytacazes, que juntos representaram mais de 90% da produção estadual (IBGE, 2024).

O sistema produtivo do abacaxizeiro é caracterizado pelo uso intensivo de agrotóxicos e adubação mineral, muitas vezes associado ao controle da fusariose, causada por *Fusarium guttiforme*, o que compromete o desenvolvimento do cultivo orgânico e estimula programas de melhoramento genético voltados à obtenção de cultivares resistentes, como a 'BRS Imperial' (Cabral e Matos, 2005).

Além disso, a nutrição mineral exerce influência direta no crescimento, na produção e na qualidade dos frutos do abacaxizeiro. Trata-se de uma cultura exigente, pois a maioria dos solos cultivados não consegue suprir integralmente suas necessidades nutricionais, tornando a adubação prática essencial nos cultivos comerciais. Entre os macronutrientes, o N e o K destacam-se como os mais influentes na qualidade dos frutos (Rodrigues et al., 2013, Oliveira et al., 2015a, Rios et al., 2018), sendo que o balanço entre esses nutrientes afeta tanto parâmetros de crescimento quanto características químicas do fruto, como teor de sólidos solúveis, acidez titulável e aceitação sensorial (Ramos et al., 2010, Caetano et al., 2013, Cunha et al., 2019, Cunha et al., 2021).

Nesse contexto, os bioinsumos organominerais têm se destacado como alternativas em estudos agronômicos voltados à nutrição vegetal e à melhoria das propriedades químicas e biológicas do solo, com respaldo de políticas públicas como o Programa Nacional de Bioinsumos (BRASIL, 2020).

Na região Norte Fluminense, a geração de subprodutos industriais é expressiva, destacando-se a torta de filtro, subproduto da indústria sucroalcooleira rico em matéria orgânica e nutrientes minerais; o resíduo da produção de ácido láctico, com geração estimada em aproximadamente 8 mil toneladas anuais; e o lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE), resíduo urbano com elevados teores de matéria orgânica e nutrientes (Guedes, 2000).

Apesar do potencial agronômico desses resíduos, ainda são escassos estudos que avaliem, de forma isolada, doses adequadas desses materiais para a cultura do abacaxizeiro, considerando respostas relacionadas ao crescimento vegetal, aos atributos químicos do solo, à nutrição da planta e à atividade microbológica do solo. Esses subprodutos podem ser utilizados como matéria-prima para a elaboração de bioinsumos (Medeiros e Lopes, 2006), sendo que sua aplicação em plantas de abacaxi pode simplificar o manejo (Carvalho et al., 2019), com resultados semelhantes aos obtidos com adubação química convencional (Brito et al., 2020).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de doses de torta de filtro, composto de lodo de estação de tratamento de esgoto e resíduo da produção de ácido láctico no cultivo do abacaxizeiro, durante a fase vegetativa, considerando parâmetros de crescimento vegetal, atributos químicos do substrato, teores de nutrientes na planta e a atividade microbológica do solo, bem como suas implicações para o manejo sustentável da cultura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do abacaxizeiro

Com origem relatada na América do Sul, em países como Brasil, Colômbia e Paraguai, o abacaxi (*Ananas comosus* (L.) Merr.) é uma fruta tropical pertencente à família Bromeliaceae. Sua disseminação para outras regiões ocorreu por meio de viajantes e exploradores, especialmente portugueses e espanhóis, além dos povos indígenas Guarani, que utilizavam o fruto, entre outras finalidades, na prevenção do

escorbuto, em função de seu elevado teor de ácido ascórbico (Wali, 2019, Hikal et al., 2021).

O abacaxizeiro é uma planta herbácea perene, com características morfológicas que o diferenciam das demais monocotiledôneas. Apresenta altura média entre 1,0 e 1,5 m, folhas duras, largas, delgadas e pontiagudas, com comprimento variando de 30 a 100 cm, dispostas ao redor de um caule curto e robusto. O fruto é do tipo infrutescência, formado por flores múltiplas dispostas em espiral ao longo do eixo, com formato cilíndrico, casca escamosa de coloração verde, marrom ou amarela, coroa de folhas verde-azuladas espinhosas e polpa fibrosa de coloração amarela e sabor característico (Wali, 2019, Hikal et al., 2021).

A composição nutricional do fruto varia de acordo com a cultivar e o estágio fenológico. Estima-se a existência de mais de 100 variedades de abacaxi, das quais apenas seis a oito são cultivadas comercialmente. Dentre estas, a cultivar ‘Smooth Cayenne’ destacou-se historicamente, representando cerca de 70% da produção mundial, embora venha sendo gradualmente substituída pelo híbrido ‘MD-2’, obtido a partir da hibridação da ‘Smooth Cayenne’, caracterizado por maior teor de açúcares, aroma mais intenso e maior vida útil pós-colheita (Hossain, 2016, Steingass et al., 2020, Mohd Ali et al., 2020).

No Brasil, o cultivo do abacaxizeiro é tradicionalmente realizado com as cultivares ‘Pérola’ e ‘Smooth Cayenne’. No entanto, a elevada suscetibilidade desses genótipos à fusariose tem ocasionado aumento nos custos de produção devido ao uso intensivo de defensivos agrícolas, resultando em prejuízos aos produtores. Diante desse cenário, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária desenvolveu, por meio de programas de melhoramento genético, híbridos superiores resistentes à fusariose, com características físico-químicas e sensoriais compatíveis com as exigências do mercado, como a cultivar ‘BRS Imperial’, resultante do cruzamento entre ‘Perolera’ e ‘Smooth Cayenne’ (Cabral e Matos, 2005).

Cultivado predominantemente em regiões tropicais e subtropicais, o abacaxi pode ser consumido *in natura* ou processado na forma de diversos produtos alimentícios (Wali, 2019, Mohd Ali et al., 2020). Em escala global, destaca-se como a terceira fruta tropical mais produzida, ficando atrás apenas da banana e da manga (Azevedo et al., 2021).

No ano de 2024, o Brasil apresentou área colhida de 56.955 ha, com produção superior a 2,3 milhões de toneladas, posicionando-se como o quarto maior produtor

mundial de abacaxi (IBGE, 2024, FAOSTAT, 2024). Nesse período, o estado do Rio de Janeiro foi responsável por cerca de 9% da produção nacional, com aproximadamente 5.000 ha colhidos. Na região Norte Fluminense, os municípios de São Francisco do Itabapoana e Campos dos Goytacazes concentraram mais de 90% da produção estadual (IBGE, 2024).

Observa-se ainda uma demanda crescente por frutas e produtos derivados do abacaxi (Aili Hamzah et al., 2021). Além do consumo *in natura*, o fruto é amplamente utilizado na forma de conservas, sobremesas, saladas, compotas, iogurtes, sorvetes e doces (Chaudhary et al., 2019). Ademais, folhas, caule e frutos, bem como seus extratos, apresentam importância na medicina tradicional, com propriedades antioxidantes, antidiabéticas, vermífugas, emenagogas e hipolipidêmicas (Jovanović et al., 2018). Dessa forma, o abacaxi é considerado uma fruta com potencial para suplementação alimentar, em função do elevado teor de açúcares, sólidos solúveis e ácido ascórbico, aliado ao baixo teor de fibra bruta (Chaudhary et al., 2019).

2.2. Nutrição do abacaxizeiro

A nutrição mineral exerce influência direta no crescimento e desenvolvimento do abacaxizeiro, bem como na produção e na qualidade dos frutos. Trata-se de uma cultura exigente em termos nutricionais quando comparada a outras espécies perenes ou anuais, uma vez que, na maioria dos casos, os solos cultivados não conseguem suprir integralmente suas demandas, tornando a prática da adubação quase obrigatória em sistemas comerciais (Crisóstomo e Naumov, 2009, Cunha, 2020, Cunha et al., 2021).

Com base em dados compilados da literatura, Crisóstomo e Naumov (2019) observaram a seguinte ordem decrescente de absorção de macronutrientes pelo abacaxizeiro: $K > N > Ca > Mg > S > P$. Em termos médios de extração por hectare, foram relatados valores de 178 kg de N, 21 kg de P e 445 kg de K, resultando em uma relação média de extração de 1:0,12:2,5 para N:P:K.

Dentre os nutrientes minerais, o N e o K destacam-se por sua influência na produtividade, qualidade dos frutos, crescimento vegetativo e floração do abacaxizeiro (Oliveira et al., 2015a, Oliveira et al., 2015b). A qualidade dos frutos pode ser avaliada por parâmetros físicos, como massa, comprimento, diâmetro, forma, cor e firmeza, e por parâmetros químicos, como sólidos solúveis, pH e acidez titulável (Conceição et al., 2016).

O balanço entre N e K é particularmente relevante, uma vez que o N está associado a parâmetros de crescimento, enquanto o K influencia diretamente características químicas do fruto, como sólidos solúveis, acidez titulável, ácido ascórbico e aceitação sensorial. Além disso, o K atua na regulação do potencial osmótico das células, na ativação enzimática e no controle da abertura estomática, conferindo maior resistência às plantas (Spironello et al., 2004, Ramos et al., 2010, Caetano et al., 2013, Cunha et al., 2019, Cunha et al., 2021).

Estudos com aplicação de doses de N e K no cultivo do abacaxizeiro 'BRS Imperial' demonstraram que o aumento das doses de N elevou o pH e o ratio dos frutos, reduzindo a acidez titulável e os sólidos solúveis, enquanto o K promoveu efeito inverso, aumentando a acidez titulável e os sólidos solúveis (Oliveira et al., 2015b). Em avaliação complementar, os mesmos autores observaram que o incremento de N favoreceu a emissão de folhas e a massa fresca de mudas, mas reduziu o potencial de florescimento induzido artificialmente, enquanto o K promoveu aumento do florescimento, da massa fresca, do comprimento da planta e do número de mudas por planta (Oliveira et al., 2015a).

A omissão de macronutrientes em plantas de abacaxizeiro da variedade 'Vitória' resultou em redução da massa fresca dos frutos, sendo o N o nutriente que mais limitou o crescimento da planta (Cunha et al., 2019). De forma semelhante, doses crescentes de K aplicadas na forma de cloreto de potássio promoveram incrementos na produtividade e na qualidade dos frutos, com aumento da massa fresca, do rendimento de polpa, da acidez titulável, dos sólidos solúveis e do teor de vitamina C, além da redução da relação SS/AT (Cunha et al., 2021).

Embora o N e o K sejam os nutrientes mais frequentemente estudados, outros elementos sob deficiência também comprometem o desenvolvimento do abacaxizeiro. Cunha (2020) observou sintomas de deficiência de fósforo (P) em plantas de 'BRS Imperial' após sete meses de cultivo, com teores foliares cerca de 50% inferiores aos do tratamento controle. Por outro lado, Caetano et al. (2013) e Spironello et al. (2004) não verificaram efeitos significativos da adubação fosfatada sobre a produção e qualidade dos frutos em 'Vitória' e 'Smooth Cayenne', respectivamente, enquanto Guarçoni e Ventura (2011) não observaram resposta do abacaxizeiro 'Gold MD-2' à adubação com P.

Deficiências de K resultaram em teores foliares de 11,6 g kg⁻¹, em comparação a 23,0 g kg⁻¹ no tratamento completo, com manifestação de sintomas

aos sete meses de cultivo (Cunha, 2020). Em relação ao cálcio (Ca), Ramos et al. (2009) não observaram sintomas visuais de deficiência aos sete meses, embora tenha sido registrada redução da massa fresca dos frutos aos nove meses. A deficiência de magnésio (Mg) provocou amarelecimento dos frutos, necrose na base das folhas e da coroa, além de redução da massa e do diâmetro dos frutos (Ramos et al., 2009). Para o enxofre (S), não foram observados sintomas visuais, mesmo sob teores reduzidos nas plantas (Ramos et al., 2009, Cunha et al., 2019).

Os estudos envolvendo micronutrientes na cultura do abacaxizeiro ainda são escassos. A deficiência de boro (B) afeta principalmente a aparência dos frutos, reduzindo sua aceitação comercial (Ramos et al., 2010), enquanto a omissão desse elemento resultou em redução da massa fresca dos frutos inteiros e sem coroa em plantas de 'Vitória' (Cunha et al., 2019).

2.3. Resíduos sólidos na região Norte Fluminense

A Lei nº 12.305/2010 define resíduo sólido como todo material descartado resultante de atividades humanas, cuja destinação final ocorre ou deve ocorrer nos estados sólido ou semissólido, incluindo gases contidos em recipientes e líquidos que demandem tratamento específico antes do descarte (BRASIL, 2012).

Na região Norte Fluminense, estudo realizado pela Agência da Bacia do Paraíba (AGEVAP, 2012) identificou elevados lançamentos de carga orgânica no município de Campos dos Goytacazes, destacando-se o grupo Águas do Paraíba e a empresa Corbion (Purac Síntese) como principais fontes. Apesar de o levantamento ter sido realizado em 2012, ainda se observa a persistência desses lançamentos em função do porte das indústrias, mesmo diante de medidas mitigadoras adotadas ao longo dos anos (Lämmle et al., 2020).

A ampliação do tratamento de esgoto doméstico é fundamental para reduzir a poluição dos mananciais, embora a cobertura dos serviços de saneamento ainda seja limitada em diversas regiões do país (Quintana et al., 2011, Siqueira et al., 2017). Como consequência, a geração de resíduos, como o lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE), torna-se um desafio ambiental, sendo o uso agrícola uma das alternativas mais estudadas para sua destinação adequada (Siqueira et al., 2017).

Além disso, a região abriga unidades industriais da Corbion, especializada na produção de ácido láctico, gerando grandes volumes de resíduos (Bootz, 2010). Da mesma forma, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar gera grandes quantidades de

resíduos, como a vinhaça e a torta de filtro, sendo estimada a produção de 30 a 40 kg de torta de filtro por tonelada de cana processada (Salomon e Lora, 2009, Prado et al., 2013).

2.3.1 Composto de lodo de ETE

O lodo de esgoto é um subproduto urbano proveniente do tratamento biológico de efluentes em estações de tratamento, cuja destinação adequada constitui um dos principais desafios operacionais desses sistemas. Após tratamento e processamento, esse resíduo apresenta potencial para uso agrícola, sendo considerado uma tendência mundial como fonte de nutrientes e matéria orgânica, com efeitos positivos sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas (Marciano, 1999, Lacerda et al., 2021).

Estudos realizados com abacaxizeiro indicaram ausência de contaminação microbiológica e de acúmulo de metais pesados em frutos fertilizados com lodo de esgoto, permanecendo dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Mota et al., 2018). Resultados semelhantes foram observados por Lopes (2018) e Siqueira (2017), que relataram concentrações de substâncias inorgânicas abaixo dos limites da Resolução CONAMA nº 375/2006.

De acordo com Lacerda et al. (2021), o lodo de esgoto tratado apresenta características que permitem sua utilização agrícola de forma segura. Em estudo conduzido com doses desse resíduo na cultura da margarida, observou-se que a maior dose aplicada (15 Mg ha^{-1}) favoreceu o crescimento das plantas e o acúmulo de N (Lacerda et al., 2021).

2.3.2. Torta de filtro

A torta de filtro é um subproduto da indústria sucroalcooleira, resultante da mistura de bagaço moído e lodo da decantação, proveniente do processo de clarificação do caldo da cana-de-açúcar (Santos et al., 2010). Trata-se de um material com elevado teor de matéria orgânica e nutrientes, como P, K, N, S, Ca, Mg e micronutrientes (Moraes et al., 2014).

A aplicação de torta de filtro promove aumento dos teores de P no solo, maior acúmulo desse nutriente pelas plantas, incremento no crescimento vegetal e estímulo à atividade microbiana do solo, quando comparada a sistemas sem sua aplicação (Caione et al., 2018). Em função dessas características, a torta de filtro, associada ou não à vinhaça, pode substituir parcialmente a adubação mineral convencional.

Diversos estudos demonstram o potencial desse coproduto na fertilização agrícola, como observado no incremento do crescimento e da produtividade do sorgo sacarino (Silva et al., 2020). Resultados positivos também foram relatados em culturas como soja e milho (Oliveira et al., 2019), alface (Assis et al., 2019) e, principalmente, na cana-de-açúcar (Almeida Júnior et al., 2011, Silva et al., 2021).

2.3.3. Resíduo da produção de ácido láctico

A Corbion produz ácido láctico a partir da sacarose, gerando grandes quantidades de resíduos sólidos, dentre os quais se destacam o gesso e o denominado “Ferkal” (Dias, 2005). O “Ferkal” é caracterizado como um resíduo alcalino, resultante da coagulação e precipitação do material proteico celular dos lactobacilos utilizados no processo fermentativo, obtido após alcalinização do mosto com cal e posterior filtração (Dias, 2005).

A produção desse subproduto é estimada em aproximadamente 8 mil toneladas por ano. Sua composição química inclui teores de N, P, Ca, S e micronutrientes, conforme descrito por Pralon et al. (2001). Pereira et al. (2004) o descreveram como um material sólido, de coloração creme, com umidade entre 70 e 80% e pH alcalino, além de baixos teores de metais pesados.

Estudos indicam que a aplicação do resíduo da produção de ácido láctico pode aumentar a disponibilidade de P em mudas de sabiá, mesmo na ausência de inoculação com fungos micorrízicos arbusculares ou rizóbio (Pralon et al., 2001). Além disso, sua alcalinidade contribui para a inertização de metais pesados, reduzindo sua biodisponibilidade no solo (Pereira et al., 2004). Em experimento conduzido por Behling (2005), a aplicação isolada ou combinada do resíduo da produção de ácido láctico e do lodo industrial promoveu incremento significativo na produtividade da soja, além de aumento nos teores de N mineral no solo.

Apesar do número ainda reduzido de estudos, as características químicas do resíduo da produção de ácido láctico demonstram seu potencial para uso agrícola, reforçando a necessidade de pesquisas adicionais que viabilizem sua utilização de forma isolada ou em combinação com outros resíduos agroindustriais.

3. TRABALHOS

3.1. TORTA DE FILTRO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA FERTILIDADE E MICROBIOTA DO SUBSTRATO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO ABACAXIZEIRO 'IMPERIAL'

A torta de filtro tem sido utilizada na agricultura como fonte de nutrientes, como nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e potássio (K). Este estudo objetivou avaliar os efeitos da torta de filtro na fertilização, microbiota, nutrição e crescimento de plantas de abacaxizeiro. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, com cinco doses de torta de filtro (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹) e um tratamento controle, utilizando mudas da cultivar 'BRS Imperial', cultivadas por 220 dias em vasos contendo solo e areia (1:1, v/v). Avaliaram-se parâmetros de crescimento, teores nutricionais na folha "D" e atributos microbiológicos e de fertilidade do substrato. Os dados foram analisados por regressão e teste de Dunnett, a 5% de probabilidade. A produção de biomassa aumentou até a dose máxima avaliada. Os teores foliares de N e Ca aumentaram cerca de 20%, enquanto o de P apresentou incremento de aproximadamente 42%. Os teores de Mg e S mantiveram-se dentro da faixa adequada, enquanto o teor de K foi reduzido. No substrato, os níveis de P aumentaram até 638% e os de Ca, 49%, em relação à dose 0, além de incrementos na matéria orgânica e na capacidade de troca de cátions (CTC) nas doses mais elevadas. Entretanto, a aplicação de doses superiores a 40 t ha⁻¹ resultou em redução da população de bactérias e fungos, com maior intensidade até a dose de 50 t ha⁻¹. De forma geral, doses de torta de filtro entre 20 e 40 t ha⁻¹ promoveram as respostas mais favoráveis entre as variáveis avaliadas, sendo a dose de 40 t ha⁻¹ a que apresentou o melhor equilíbrio entre melhoria da fertilidade do substrato, nutrição vegetal e manutenção da atividade microbiana. Conclui-se que a torta de filtro é uma fonte relevante de nutrientes para o abacaxizeiro; entretanto, seu uso deve ser complementado com outras fontes, como resíduos orgânicos, biofertilizantes ou suplementos minerais, a fim de evitar desequilíbrios nutricionais e impactos negativos sobre a microbiota do substrato.

Palavras-chave: *Ananas comosus* (L.) Merr.; Sustentabilidade; Resíduo.

SUGARCANE FILTER CAKE ON SUBSTRATE FERTILITY AND MICROBIOTA, GROWTH, AND NUTRITION OF 'IMPERIAL' PINEAPPLE

ABSTRACT

Filter cake has been used in agriculture as a source of nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P), and calcium (Ca). This study aimed to evaluate the effects of filter cake on fertilization, microbiota, nutrition, and growth of pineapple plants. The experiment was conducted in a greenhouse using a randomized block design, with five filter cake rates (0, 20, 40, 60, and 80 t ha⁻¹) and a control treatment. Seedlings of the cultivar 'BRS Imperial' were grown for 220 days in pots containing a 1:1 (v/v) mixture of soil and sand. Growth parameters, nutrient contents in the 'D' leaf, and microbiological and substrate fertility attributes were evaluated. Data were analyzed by regression analysis and Dunnett's test at a 5% probability level. Biomass production increased with increasing application rates, reaching its maximum at the highest rate. Leaf N and Ca contents increased by approximately 20%, and P by about 42%. Magnesium and S contents remained within the adequate range, whereas K content was reduced. In the substrate, P levels increased by up to 638% and Ca by 49% compared to the 0 rate, along with increases in organic matter and cation exchange capacity (CEC) at higher application rates. However, application rates above 40 t ha⁻¹ reduced bacterial and fungal populations, with a more pronounced effect up to the 50 t ha⁻¹ rate. Overall, filter cake rates between 20 and 40 t ha⁻¹ promoted the most favorable responses among the evaluated variables, with 40 t ha⁻¹ providing the best balance between improvements in substrate fertility, plant nutrition, and maintenance of microbial activity. In conclusion, filter cake is a relevant nutrient source for pineapple plants; however, its use should be complemented with other organic or mineral sources to prevent nutritional imbalances and adverse effects on substrate microbiota.

Keywords: *Ananas comosus* (L.) Merr.; Sustainability; Residue.

INTRODUÇÃO

A elevação da demanda e, conseqüentemente, o aumento da produção de alimentos nos últimos anos têm impulsionado a geração de resíduos agrícolas e agroindustriais (Gonçalves et al., 2023). Uma alternativa para reforçar a sustentabilidade agrícola, evitando o acúmulo desses materiais no meio ambiente e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos, é a utilização desses resíduos como insumos na agricultura (Aquino et al., 2005, Silva et al., 2021).

Um dos resíduos produzidos em grande quantidade é a torta de filtro da cana-de-açúcar, subproduto gerado durante o processo de produção açucareira, na proporção de 30 a 40 kg para cada tonelada (t) de cana processada. Esse material apresenta em sua composição nutrientes minerais, como Ca, P, K, N e micronutrientes, com concentrações que variam de acordo com a variedade da cana, o período de maturação, o processo de clarificação e o tipo de solo (Fravet et al., 2010, Gonçalves et al., 2023).

A cultura da cana-de-açúcar é amplamente cultivada em diversas regiões do mundo (FAOSTAT, 2024), tendo atingido aproximadamente 2 bilhões de toneladas produzidas em 2023. O Brasil é o principal produtor, representando cerca de 38% da produção mundial, com aproximadamente 783 milhões de toneladas. Esses valores evidenciam a grande quantidade de resíduo gerado, estimada em torno de 3,5% da cana processada, que, se mal manejado, pode representar um problema ambiental significativo.

Diversos estudos têm demonstrado a eficiência da adubação com torta de filtro, tanto em uso isolado quanto em associação com outros resíduos, fertilizantes minerais ou produtos biológicos, promovendo aumento da produtividade de culturas como cana-de-açúcar, soja, batata, manga e feijão (Fravet et al., 2010, Barros et al., 2019, Silva et al., 2020, Gonçalves et al., 2021, Ali et al., 2022, Ge et al., 2022).

O abacaxi [*Ananas comosus* (L.) Merr.] é uma fruta típica de regiões tropicais e subtropicais, consumida mundialmente tanto *in natura* quanto na forma de produtos industrializados (Weifeng et al., 2020). Entre as frutas tropicais, destaca-se como uma das mais importantes, com crescimento contínuo no mercado global, impulsionado por suas características sensoriais, como sabor, aroma e cor (Mohd Ali et al., 2022).

No ano de 2023, foram produzidas mais de 29 milhões de toneladas de abacaxi em todo o mundo, sendo os cinco principais países produtores Indonésia ($\cong$

3,16 milhões de t), Filipinas ($\cong$ 2,94 milhões de t), Costa Rica ($\cong$ 2,94 milhões de t), Brasil ($\cong$ 2,39 milhões de t) e China ($\cong$ 2,1 milhões de t) (FAOSTAT, 2024).

O abacaxizeiro é uma cultura exigente em nutrientes, cuja demanda varia em função de fatores edafoclimáticos, manejo, cultivar, densidade de plantio e destino da produção, seja para consumo *in natura* ou para a indústria (Loures et al., 2021). O K e o N são os nutrientes mais absorvidos pela cultura, sendo o N diretamente relacionado ao tamanho e ao peso dos frutos, enquanto o K influencia principalmente a qualidade físico-química (Omotoso e Akinrinde, 2013, Cunha et al., 2021).

O uso da fertilização mineral no solo e a necessidade de aprimoramento dessas práticas têm sido amplamente discutidos. Nesse contexto, torna-se fundamental avançar em estratégias de reciclagem, recuperação e reutilização de nutrientes, como o P, cujas fontes naturais são finitas e não renováveis, mas que pode ser encontrado em quantidades relevantes em resíduos como a torta de filtro, a qual apresenta potencial como fertilizante fosfatado na produção de cana-de-açúcar (Acevedo-Gómez et al., 2020).

Diante desse cenário, considerando o potencial agrônomo da torta de filtro e a importância econômica do abacaxizeiro, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de doses desse resíduo no cultivo do abacaxizeiro 'BRS Imperial', bem como sua contribuição para a fertilidade e a microbiologia do solo.

Parte-se da hipótese de que a aplicação de torta de filtro promove melhorias nos atributos químicos e microbiológicos do solo, refletindo em incremento no crescimento e no estado nutricional do abacaxizeiro. Adicionalmente, supõe-se que doses intermediárias do resíduo proporcionem maior eficiência agrônoma, enquanto doses elevadas podem não resultar em ganhos proporcionais ou até causar efeitos negativos no sistema solo-planta.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Unidade de Apoio à Pesquisa do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), no município de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil (21°45'S e 41°17'W, a 11 m de altitude), em casa de vegetação, entre os meses

de janeiro e agosto de 2024. Nesse período, a temperatura diária máxima no interior da casa de vegetação variou entre 38 e 49°C, enquanto a mínima variou entre 15 e 22°C. Os dados foram obtidos por meio de registrador automático HOBO® Data Logger Pro v2 (Onset Headquarters, Bourne, MA, EUA) (Figura 1).

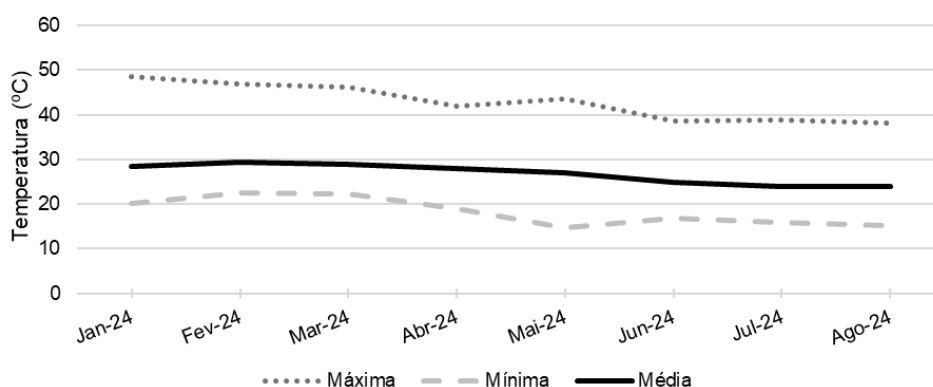


Figura 1. Temperatura máxima, mínima e média da casa de vegetação (Data Logger HOBO® pro v2) de janeiro a agosto de 2024, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Delineamento e condução do experimento

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), com 5 + 1 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de torta de filtro (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹), aplicadas como única fonte de fertilização, sem qualquer complementação mineral, e um tratamento adicional (controle), que recebeu adubação mineral conforme recomendado por Souza e Oliveira (2021). Ao todo, foram utilizadas 24 unidades experimentais, sendo cada unidade composta por dois vasos, com duas mudas de abacaxizeiro cada.

Foram utilizadas mudas do abacaxizeiro 'BRS Imperial', obtidas no município de São Francisco de Itabapoana (RJ), classificadas quanto à massa fresca (MF), altura de planta (AP), número de folhas (NF) e diâmetro do coleto (DC). As mudas apresentaram, em média, 185 g de MF, 47 cm de AP, 29 folhas e 25 mm de DC. Após a classificação, foram agrupadas de acordo com a MF e distribuídas de forma homogênea entre os blocos e tratamentos.

Para o plantio das mudas, foram utilizados vasos com volume de 18,5 dm³, preenchidos com 16 dm³ de uma mistura de Argissolo Amarelo Distrófico, coletado em subsuperfície, e areia, na proporção de 1:1 (v/v), além de 2 dm³ de brita nº 1 no fundo do vaso, com a finalidade de facilitar a drenagem. O solo foi coletado na Escola Técnica Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes (21°45'S e

41°20'W, a 10 m de altitude), localizada a 12 km da UENF, enquanto a areia foi obtida em areal comercial do mesmo município.

Foi realizada a caracterização química e granulométrica do substrato de acordo com Teixeira et al. (2017), sendo este classificado como franco-arenoso (Tabela 1). Em seguida, procedeu-se à calagem, com aplicação de 0,44 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 98%, com o objetivo de elevar a saturação por bases (V%) para 60% (Teixeira et al., 2017).

Tabela 1. Características físico-químicas do substrato utilizado no experimento

pH – H ₂ O	S-SO ₄	P	K	Ca	Mg	H+Al	C	MO	CTC
-	-----mg dm ⁻³ -----						g dm ⁻³	dag kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³
5,2	10	5	1,20	16,30	14,40	29,20	7,20	1,24	62,0
SB	V	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Areia	Silte	Argila
mmol _c dm ⁻³	%			-----mg dm ⁻³ -----				-----%	
32,80	53	160,61	1,07	2,98	28,46	0,10	66,3	16,5	17,2

pH em água; P; Na; K; Fe; Zn; Mn; Cu – Extrator: Mehlich 1, Ca; Mg; Al- Extrator: KCl 1 mol L⁻¹, H+Al – Extrator: Acetato de Cálcio 0,5 mol L – pH 7,0, B – Extrator: Água quente; S - Extrator: Fosfato monoácido, SB - Soma de bases trocáveis, CTC – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0, V - Índice de saturação de bases, C- Carbono orgânico, MO – Matéria orgânica = C. Org x 1,724 – Walkley-Black.

A torta de filtro utilizada foi doada pela Cooperativa Agroindustrial do Estado do Rio de Janeiro – COAGRO, que fica localizada a cerca de 21 km da sede do município de Campos dos Goytacazes. As amostras do resíduo foram utilizadas imediatamente após o recebimento e não foi aplicado nenhum tipo de tratamento adicional. Ao mesmo tempo, as amostras seguiram para a determinação dos teores dos nutrientes (Teixeira et al., 2017) (Tabela 2).

Tabela 2. Características químicas da torta de filtro da cana-de-açúcar

pH – H ₂ O	PMS	N	P	K	Ca	Mg	S
-	%						
6,03	56,75	6,29	6,25	2,93	12,95	2,80	0,90
Cu	Mo	Ni		Zn	B	Mn	Fe
				-----mg kg ⁻¹ -----			
1,50	0,32	2,80		138,0	6,0	504,10	11097,0

pH em água; N total: Kjeldahl; PMS - Percentual de massa sólida: NBR 6457/2016; P, K, Ca, Ms e S: ICP-MS EPA 6020 B / 200.8.

Após o plantio das mudas, os vasos foram irrigados diariamente por meio de sistema de gotejamento, com vazão de 1,2 L h⁻¹ durante 15 minutos, conforme recomendado para a cultura do abacaxizeiro (Souza e Reinhardt, 2007).

Foram realizadas três adubações no tratamento controle, conforme recomendado por Souza e Oliveira (2021) para o abacaxizeiro irrigado, com base na análise de solo. A primeira adubação foi realizada aos 30 dias após o plantio, com aplicação de 60, 52,4 e 83 kg ha⁻¹ de N, P e K, respectivamente; a segunda, aos 120 dias após o plantio, com 80 e 83 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente; e a terceira, aos 180 dias após o plantio, com 90 e 91,3 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente.

Os fertilizantes utilizados foram ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, como fontes de N, P e K, respectivamente.

Aos 220 dias após o plantio das mudas, foi realizada a coleta do experimento, seguida das análises biométricas, nutricionais e de fertilidade do substrato.

Avaliação do crescimento vegetal

Após a coleta, foram avaliados o comprimento da parte aérea (CPA), o número de folhas (NF) e o diâmetro do coleto (DC), além do comprimento da folha “D” (CFD), da largura da folha “D” (LFD) e da área foliar da folha “D” (AFFD).

Em seguida, o material foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72h. Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se a matéria seca da parte aérea (MSPA), a matéria seca da raiz (MSR) e a matéria seca da folha “D” (MSFD).

Quantificação dos teores nutricionais foliares

Para a determinação dos teores nutricionais, foram utilizadas folhas “D” inteiras, previamente limpas com algodão umedecido em água deionizada e, após a secagem, moídas em moinho de facas do tipo Willey. Em seguida, foi pesada uma amostra de 0,1 g para análise dos teores de nutrientes minerais.

Para a quantificação de N amoniacal e P, as amostras foram submetidas à digestão sulfúrica e, no extrato, os teores de N foram determinados pelo método de Nessler, com leitura em espectrofotômetro Specord® a 480 nm (Jackson, 1958), enquanto os teores de P foram determinados a 725 nm.

Os nutrientes K, Ca, Mg, S, ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) foram determinados após digestão aberta com HNO₃ concentrado e H₂O₂, enquanto o boro (B) foi analisado por digestão seca (Malavolta et al., 1997, Miyazawa et al., 2009), e determinados em plasma (ICPE-9000) Shimadzu® (Peters, 2005).

Análise química do substrato

Ao final do experimento, foi realizada a análise química do substrato. A coleta foi efetuada em cada vaso com o uso de amostrador do tipo sonda, em todo o perfil, a 2 cm de distância da borda. Foram retiradas duas amostras simples por vaso, que foram posteriormente homogeneizadas, originando uma amostra composta por unidade experimental.

Foram determinados o pH em água (pH H₂O), a matéria orgânica (MO), a acidez potencial (H + Al), a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions efetiva (t), a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T), a saturação por bases (V%) e os teores de P, S, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn, Zn e cobre (Cu), conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Contagem da população microbiana

Foi realizada a quantificação da população microbiana do substrato ao final do experimento, empregando-se o método de contagem de unidades formadoras de colônias (UFC). Esse método consiste na inoculação de uma suspensão do substrato em placas de Petri estéreis contendo meio de cultura de Bunts e Rovira (1995), com pH 6,8, para bactérias, e meio de Martin (1950), com pH 6,0, para fungos, ambos ajustados antes da autoclavagem (Martin, 1950).

Inicialmente, foram coletadas quatro amostras por vaso, a 5 cm da borda e 10 cm de profundidade, totalizando oito amostras simples por unidade experimental, as quais foram homogeneizadas, originando uma amostra composta. As amostras foram mantidas sob refrigeração a 4°C por 15 dias. Após esse período, foram peneiradas em malha de 2 mm e separadas duas subamostras de 10 g: uma destinada à determinação da massa de solo seco (secagem por 72h a 100°C) e outra utilizada para a diluição seriada.

Para a diluição, o material foi transferido para frascos Erlenmeyer contendo 90 mL de solução salina esterilizada (0,85%), iniciando-se a série de diluições. Em seguida, foram realizadas as inoculações em placas de Petri, em triplicata, utilizando-se 0,1 mL das diluições de 10⁻¹ a 10⁻⁶ para bactérias e de 10⁻¹ a 10⁻⁵ para fungos.

As culturas foram incubadas em câmara tipo BOD a 28°C por 48h para bactérias e 120h para fungos. Após a incubação, foram selecionadas as diluições de 10⁻³ e 10⁻¹ para bactérias e fungos, respectivamente, por apresentarem contagens dentro da faixa recomendada pela literatura (30 a 300 colônias por placa).

A quantificação dos microrganismos foi expressa em unidades formadoras de colônias por grama de solo (UFC g⁻¹), conforme apresentado na Equação 1.

$$\text{UFC g}^{-1}\text{de solo} = \frac{[\text{N}^{\circ} \text{ de colônias} \times \left(\frac{1}{\text{diluição}}\right) \times \left(\frac{1}{\text{aliquota}}\right)]}{\text{massa do solo seco}} \quad (1)$$

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro–Wilk e de homogeneidade de variâncias de Bartlett, ambos a 5% de significância. Após o atendimento a esses pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) e, quando observados efeitos significativos, os dados foram submetidos à análise de regressão para ajuste do modelo mais adequado.

Adicionalmente, foi realizado o teste de Dunnett, a 5% de significância, para comparação das doses com o tratamento adicional (controle).

As análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 4.4.2), com auxílio do pacote “Tratamentos.ad”, enquanto os gráficos foram elaborados no software SigmaPlot (versão 14.5).

Para as populações de microrganismos, os dados foram previamente transformados em logaritmo antes da realização da análise de variância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fertilidade do substrato

Os parâmetros de fertilidade do substrato foram significativamente influenciados pela aplicação de torta de filtro. O teor de matéria orgânica aumentou de forma linear, com incremento de 28,36% na maior dose avaliada. A acidez potencial também apresentou aumento, com incremento de 29,79% na dose máxima em relação à menor dose, atingindo valor de 3,05 cmolc dm⁻³.

O pH do substrato ajustou-se ao modelo quadrático de regressão, com valor máximo estimado de 5,61 na dose de 38,6 t ha⁻¹ de torta de filtro. A soma de bases (SB) apresentou comportamento quadrático, com valor máximo estimado de 3,86 cmolc dm⁻³ na dose de 57,51 t ha⁻¹. Da mesma forma, a saturação por bases (V%) ajustou-se ao modelo quadrático, com valor máximo estimado de 58,9% na dose de 40,61 t ha⁻¹.

Por outro lado, a capacidade de troca de cátions efetiva (t) e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) aumentaram de forma linear com o incremento das doses, apresentando acréscimos de 24,92% e 25,81%, com valores máximos de 4,01 e 6,97 cmolc dm⁻³, respectivamente (Figuras 2A, 2B e 2C).

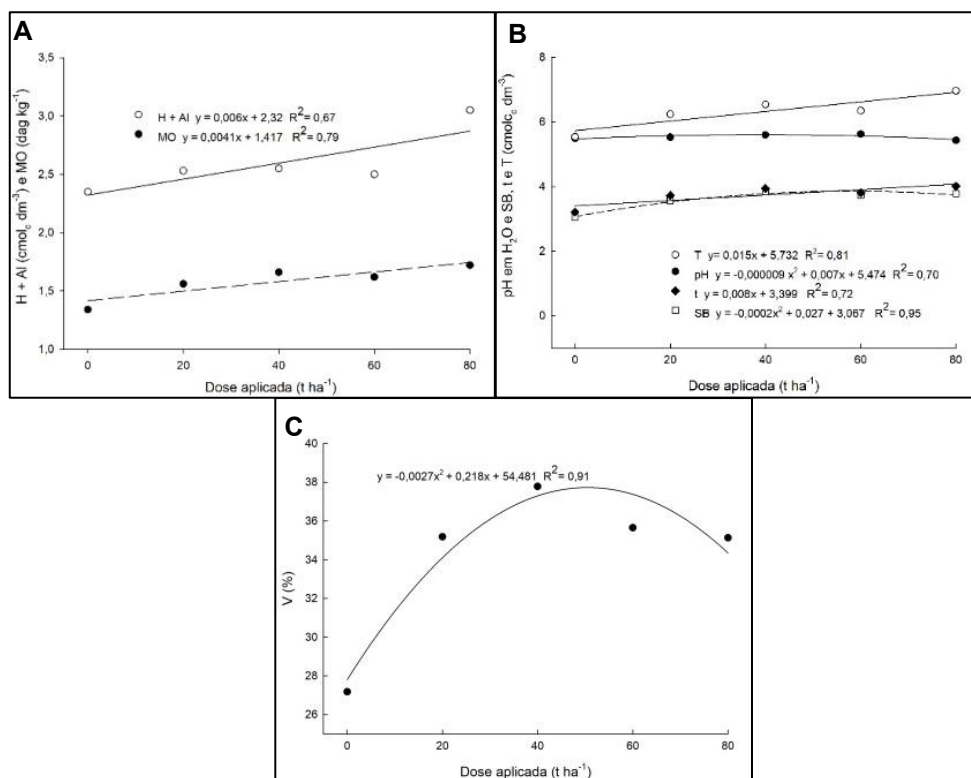


Figura 2. Fertilidade do substrato ao final do experimento – Acidez potencial (H+Al) e Matéria Orgânica (MO) (A), pH em H₂O, Soma de bases (SB), Capacidade de troca de cátions efetiva (t), e Capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) (B), e Saturação por bases (V%) (C).

Em relação à comparação com o tratamento controle, os teores de matéria orgânica foram superiores a partir da dose de 40 t ha⁻¹. A acidez potencial apresentou diferença apenas na dose de 0 t ha⁻¹, com valor inferior ao controle.

Para o pH do substrato, com exceção da maior dose avaliada, os demais tratamentos apresentaram valores superiores ao controle. A soma de bases (SB) não diferiu significativamente do controle em nenhuma das doses avaliadas.

Comportamento semelhante foi observado para a saturação por bases (V%), exceto nas doses de 40 e 60 t ha⁻¹, nas quais os valores foram superiores ao controle. A capacidade de troca de cátions efetiva (t) e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) não diferiram do controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 3).

Tabela 3. Fertilidade do substrato em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	pH (H ₂ O)	MO	H+Al	SB	t	T	V
	-	dag kg ⁻¹	-----cmolc dm ⁻³ -----				%
Controle	5,23	1,31	2,80	3,37	3,72	6,28	53,53
0 t ha ⁻¹	5,50 ⁺	1,34 ^{ns}	2,35 ⁻	3,04 ^{ns}	3,21 ^{ns}	5,54 ^{ns}	54,84 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	5,53 ⁺	1,56 ^{ns}	2,53 ^{ns}	3,57 ^{ns}	3,72 ^{ns}	6,24 ^{ns}	57,12 ^{ns}
40 t ha ⁻¹	5,60 ⁺	1,66 ⁺	2,55 ^{ns}	3,84 ^{ns}	3,94 ^{ns}	6,54 ^{ns}	58,71 ⁺
60 t ha ⁻¹	5,63 ⁺	1,62 ⁺	2,50 ^{ns}	3,74 ^{ns}	3,81 ^{ns}	6,35 ^{ns}	58,81 ⁺
80 t ha ⁻¹	5,43 ^{ns}	1,72 ⁺	3,05 ^{ns}	3,79 ^{ns}	4,01 ^{ns}	6,97 ^{ns}	54,32 ^{ns}
CV(%)	2,03	8,95	6,61	8,77	8,60	6,44	3,78

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

Todos os tratamentos com aplicação de torta de filtro, a partir da dose de 20 t ha⁻¹, foram classificados como de teor médio de matéria orgânica, com valores entre 1,5 e 3,0 dag kg⁻¹, enquanto o tratamento com adubação convencional e a dose 0 t ha⁻¹ permaneceram classificados como de teor baixo, com valores inferiores a 1,5 dag kg⁻¹, conforme Sobral et al. (2015). Esse comportamento é coerente com o teor inicial de matéria orgânica do substrato (1,24 dag kg⁻¹) e com a adição gradual de carbono promovida pelo resíduo. Trabalhos relatam elevado teor de matéria orgânica na torta de filtro, com valores variando entre 22,6% e 70%, o que explica os incrementos observados no solo após sua aplicação (Campiteli et al., 2018, Acevedo-Gómez et al., 2020, Gonçalves et al., 2023).

Em relação à acidez potencial, o valor inicial do substrato antes da calagem foi de 2,92 cmolc dm⁻³, prática que pode ter contribuído para a redução geral dos teores de H⁺ e Al³⁺. A semelhança entre os valores observados no tratamento controle e na maior dose pode estar associada a dois fatores distintos: no tratamento controle, a adubação nitrogenada pode ter promovido acidificação do substrato; já na maior dose de torta de filtro, o incremento da matéria orgânica pode ter contribuído para o aumento da acidez potencial, em função da adição de novos sítios de troca provenientes de grupamentos funcionais, favorecendo a complexação do Al³⁺ (Bettiol et al., 2023).

Com exceção do tratamento controle, os valores de pH foram superiores ao valor inicial do substrato (5,2), possivelmente em função da calagem. Mesmo o tratamento controle tendo recebido calagem, a adubação nitrogenada pode ter contribuído para a redução do pH, resultando em valor de 5,23, o que é reforçado pela

comparação com a dose 0 t ha^{-1} , que apresentou pH de 5,5 (Cai et al., 2015). Nas condições do ensaio, valores de pH acima de 5,0 indicam que o alumínio trocável se encontra insolubilizado, não causando danos ao sistema radicular e favorecendo a disponibilidade e absorção dos demais nutrientes (Sobral et al., 2015).

O comportamento quadrático observado para a soma de bases (SB) pode ser explicado, em parte, pela dinâmica de K e Mg, que apresentaram tendência semelhante ao longo das doses. Quanto à saturação por bases (V%), os valores observados foram classificados como médios, situando-se entre 50% e 70%, conforme Sobral et al. (2015). Segundo Ronquim (2010), valores de V% entre 50% e 80% são considerados ideais para o desenvolvimento da maioria das culturas, sendo um importante indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. Gonçalves et al. (2023) também observaram valores de saturação por bases estatisticamente semelhantes ao comparar doses de torta de filtro com adubação convencional.

A capacidade de troca de cátions efetiva (t) e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) foram classificadas como médias, indicando melhoria da CTC do substrato, cujo valor inicial de T era de $6,2 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (Ronquim, 2010). Por outro lado, os valores de t e T indicam que aproximadamente 42,7% das cargas negativas da CTC efetiva estavam ocupadas por íons H^+ , condição que pode ser atenuada com o aumento do pH do substrato (Ronquim, 2010). Acevedo-Gómez et al. (2020) observaram incremento de 11,8% na capacidade de troca catiônica em solo cultivado com abacaxi após 14 meses da aplicação combinada de torta de filtro e lodo da indústria de papel. Por sua vez, Gonçalves et al. (2023) não verificaram diferenças significativas nos valores de CTC ao comparar doses de torta de filtro com adubação convencional, resultado que corrobora o presente estudo, no qual os valores de t e T não diferiram do tratamento com fertilização mineral.

Quanto aos nutrientes no substrato, os teores de S, B e Cu não foram significativamente afetados pela aplicação do resíduo, apresentando médias de 5,45, 0,15 e $1,17 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente.

Os teores de P apresentaram incremento linear com o aumento das doses de torta de filtro, com aumento de 638,89% ao comparar a maior com a menor dose, sendo superiores ao controle a partir de 40 t ha^{-1} . O K ajustou-se a modelo quadrático, com teor máximo estimado de $0,94 \text{ mmolc dm}^{-3}$ na dose de $37,5 \text{ t ha}^{-1}$, mantendo-se inferior ao controle em todas as doses avaliadas. Os teores de Ca aumentaram de forma linear com o incremento das doses, com aumento de 49% na maior dose em

relação à menor, sendo superiores ao controle a partir de 40 t ha⁻¹. Por sua vez, o Mg apresentou ajuste quadrático, com valor máximo estimado de 1,02 cmolc dm⁻³ na dose de 25 t ha⁻¹, sem diferença significativa em relação ao controle (Figuras 3A e 3B).

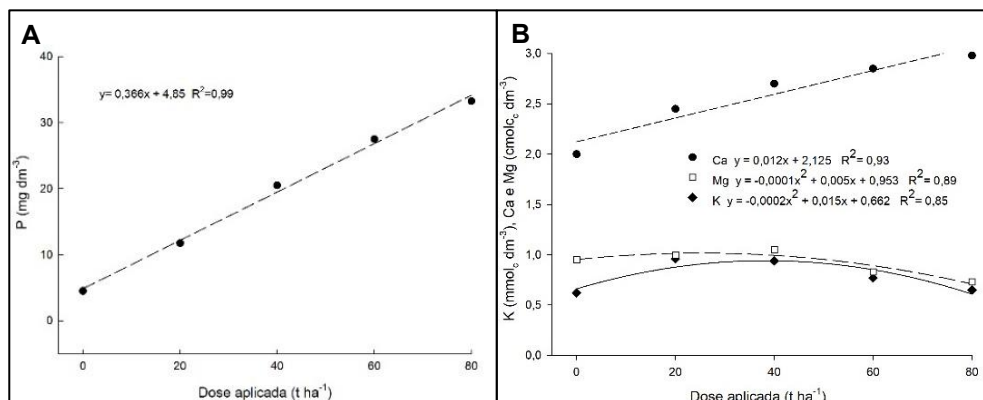


Figura 3. Fertilidade do substrato ao final do experimento – Fósforo (P) (A) e Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) (B).

Em comparação ao tratamento controle, os teores de P foram superiores a partir da dose de 40 t ha⁻¹, mantendo-se elevados até a maior dose avaliada. Em contrapartida, os teores de K foram inferiores ao controle em todas as doses de torta de filtro.

Para Ca, observou-se superioridade em relação ao controle a partir da dose de 40 t ha⁻¹, refletindo o aporte desse nutriente pelo resíduo. Já os teores de Mg e S não diferiram significativamente do controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 4).

Tabela 4. Fertilidade do substrato em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	P	S	K	Ca	Mg
	---mg dm ⁻³ ---		mmol _c dm ⁻³	---cmol _c dm ⁻³ ---	
Controle	7,25	7,50	6,52	2,10	0,93
0 t ha ⁻¹	4,50 ^{ns}	4,75 ^{ns}	0,62 ⁻	2,00 ^{ns}	0,95 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	11,75 ^{ns}	5,00 ^{ns}	0,96 ⁻	2,45 ^{ns}	1,00 ^{ns}
40 t ha ⁻¹	20,50 ⁺	6,75 ^{ns}	0,94 ⁻	2,70 ⁺	1,05 ^{ns}
60 t ha ⁻¹	27,50 ⁺	5,25 ^{ns}	0,77 ⁻	2,85 ⁺	0,83 ^{ns}
80 t ha ⁻¹	33,25 ⁺	5,50 ^{ns}	0,65 ⁻	2,98 ⁺	0,73 ^{ns}
CV(%)	22,81	26,30	5,03	7,57	12,27

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

O incremento expressivo dos teores de P com o uso da torta de filtro, que apresentou, dentre os nutrientes avaliados, o maior aumento no substrato, evidencia o potencial desse resíduo como alternativa sustentável para a agricultura em solos pobres nesse nutriente, como os solos brasileiros (Souza Júnior et al., 2024). Outros autores também relataram teores elevados de P nesse resíduo (Acevedo-Gómez et al., 2020, Gonçalves et al., 2023). Gonçalves et al. (2023), ao avaliarem doses de torta de filtro em comparação com a adubação convencional no cultivo da soja, não observaram diferenças significativas nos teores de P no solo, sendo relatado teor de 16,90 mg dm⁻³ no resíduo. Campiteli et al. (2018), por sua vez, ao compararem áreas fertilizadas com torta de filtro, fertilização convencional, ausência de adubação e aplicação de vinhaça, observaram incremento significativo nos teores de P-resina, com valores de 1024, 35, 24 e 9 mg dm⁻³, respectivamente.

A redução dos teores de K, a partir do ponto de máxima, pode estar associada ao aumento dos teores de Ca no substrato, uma vez que concentrações elevadas de Ca em relação ao K podem ocasionar efeito antagônico entre esses nutrientes (Moreira et al., 1999, Werle et al., 2008, Neves et al., 2009). Além disso, o Ca apresenta maior afinidade por sítios de troca e por compostos orgânicos do solo, formando complexos mais estáveis com a matéria orgânica, o que contribui para a manutenção de sua disponibilidade mesmo em condições de aumento da acidez potencial. Em contrapartida, o K, por apresentar ligação predominantemente eletrostática e menor retenção nos coloides do solo, torna-se mais suscetível à lixiviação e à redução da disponibilidade em condições de menor pH, especialmente em substratos com maior proporção de areia e baixa CTC (Marschner, 2012).

Esse comportamento pode ter sido intensificado pelo baixo teor inicial de K no substrato ($1,2 \text{ mmolc dm}^{-3}$), pelo reduzido teor do nutriente no resíduo ($2,93 \text{ g kg}^{-1}$) em comparação a outros elementos e pela textura do substrato, composto pela proporção 1:1 (v/v) entre solo e areia, favorecendo perdas por lixiviação. Assim, mesmo no tratamento controle, os teores de K permaneceram baixos, resultando em deficiência do nutriente (Neves et al., 2009, Werle et al., 2008).

Embora a torta de filtro tenha se mostrado eficiente no aumento dos teores de alguns nutrientes no solo, especialmente N e P, seu uso isolado pode resultar em desequilíbrios nutricionais, em função do menor aporte de K. Nesse sentido, o uso combinado com outras fontes pode potencializar seus efeitos. Acevedo-Gómez et al. (2020), ao combinarem torta de filtro com lodo da indústria de papel, após 14 meses de aplicação em solos cultivados com abacaxizeiro no México, observaram incrementos de até 422%, 90% e 104% nos teores de N, P e K no solo.

O aumento linear dos teores de Ca com a aplicação da torta de filtro pode ser explicado pelo elevado teor desse nutriente no resíduo, que apresentou concentração de $12,95 \text{ g kg}^{-1}$. O incremento observado, inclusive na dose 0 t ha^{-1} , pode estar relacionado à aplicação de calcário para elevação da saturação por bases em todos os tratamentos, contribuindo para o aumento dos teores de Ca e Mg. Resultados semelhantes foram relatados por Gonçalves et al. (2023), que não observaram diferenças significativas nos teores de Ca ao comparar doses de torta de filtro com adubação convencional, bem como por Acevedo-Gómez et al. (2020), que verificaram incremento superior a 3000% nos teores de Ca com o uso combinado de torta de filtro e lodo da indústria de papel após 14 meses.

O comportamento quadrático observado para Mg pode estar associado à inibição competitiva provocada pelo aumento dos teores de Ca no substrato, conforme relatado por Moreira et al. (1999), Medeiros et al. (2008) e Silva e Trevizam (2015). Apesar de o teor de Mg na torta de filtro ser inferior ao de Ca, estudos como o de Campiteli et al. (2018) demonstram que o resíduo apresenta potencial para incrementar os teores desse nutriente no solo, inclusive quando comparado a sistemas com adubação convencional.

Os micronutrientes apresentaram respostas diferenciadas à aplicação das doses de torta de filtro. Os teores de Mn ajustaram-se a modelo quadrático, com valor máximo estimado de $40,37 \text{ mg dm}^{-3}$ na dose de $58,88 \text{ t ha}^{-1}$. Para Zn, o melhor ajuste foi linear, com incremento de 57,2% entre a menor e a maior dose aplicada. Em

contraste, os teores de Fe apresentaram redução linear com o aumento das doses, com decréscimo de 11,62% na maior dose em relação à menor, enquanto B e Cu não apresentaram variação significativa com o incremento das doses (Figura 4A, 4B e 4C).

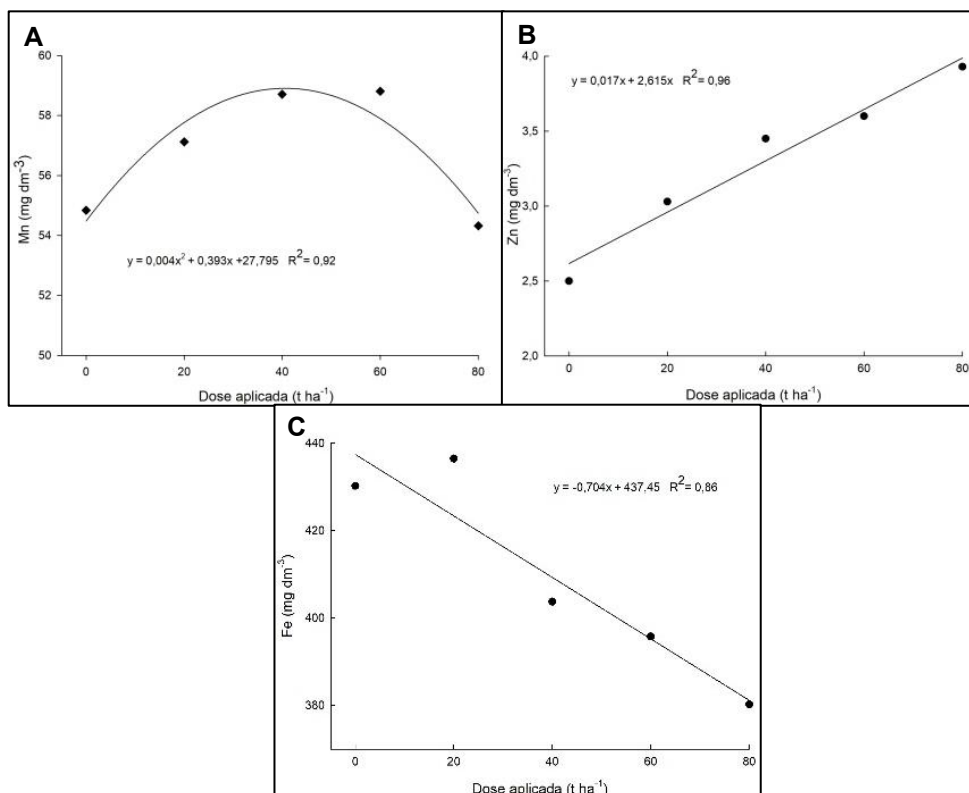


Figura 4. Fertilidade do substrato ao final do experimento – Manganês (Mn) (A), Zinco (Zn) (B), e Ferro (Fe) (C).

Em comparação ao tratamento controle, os teores de Mn foram superiores a partir da dose de 20 t ha⁻¹ até a dose máxima avaliada. Para Zn, os valores foram superiores ao controle a partir da dose de 40 t ha⁻¹.

Por outro lado, os teores de Fe, B e Cu não diferiram significativamente do controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 5)

Tabela 5. Fertilidade do substrato em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
-----mg dm ⁻³ -----					
Controle	0,09	0,95	409,50	28,53	2,60
0 t ha ⁻¹	0,14 ^{ns}	1,05 ^{ns}	430,25 ^{ns}	27,18 ^{ns}	2,50 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	0,13 ^{ns}	1,20 ^{ns}	436,50 ^{ns}	35,18 ⁺	3,03 ^{ns}
40 t ha ⁻¹	0,11 ^{ns}	1,28 ^{ns}	403,75 ^{ns}	37,78 ⁺	3,45 ⁺
60 t ha ⁻¹	0,13 ^{ns}	1,23 ^{ns}	395,75 ^{ns}	35,65 ⁺	3,60 ⁺
80 t ha ⁻¹	0,15 ^{ns}	1,08 ^{ns}	380,25 ^{ns}	35,13 ⁺	3,93 ⁺
CV(%)	23,06	28,69	5,85	6,61	8,97

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

A ausência de resposta dos teores de B e Cu à aplicação das doses de torta de filtro, tanto em relação às doses quanto ao tratamento controle, indica baixa contribuição desse resíduo para o fornecimento desses micronutrientes ao substrato, refletindo os baixos teores médios observados ao longo do experimento.

O incremento dos teores de Mn e Zn com o aumento das doses pode estar associado à adição direta desses elementos pela torta de filtro e ao aumento da matéria orgânica no sistema, que favorece sua manutenção em formas mais disponíveis no solo. O comportamento observado para Mn, com resposta quadrática, e para Zn, com resposta linear, evidencia diferenças na dinâmica desses micronutrientes no substrato ao longo das doses aplicadas.

Por outro lado, a redução dos teores de Fe com o aumento das doses pode ser explicada pela complexação desse elemento com exsudatos radiculares na forma de ácidos orgânicos, em ampla faixa de pH (4,0 a 7,0), além da forte afinidade do Fe³⁺ pela matéria orgânica, formando complexos estáveis. Esse comportamento difere daquele observado para Zn²⁺ e Mn²⁺, que apresentam menor afinidade de complexação com a matéria orgânica (Sposito, 1989, Stevenson, 1994).

Resultados semelhantes foram observados por Acevedo-Gómez et al. (2020), que relataram redução significativa nos teores de Fe, apresentação com comportamento diferente para Zn e Mn após 14 meses da aplicação combinada de torta de filtro e lodo da indústria de papel.

População de microrganismos

A população de bactérias do substrato ajustou-se ao modelo linear decrescente, com redução de 6,15% entre a menor e a maior dose de torta de filtro aplicada, correspondendo a uma diminuição da ordem de $3,76 \times 10^{-4}$ UFC g^{-1} entre as doses de 0 e 80 $t\ ha^{-1}$.

Para a população fúngica, observou-se comportamento quadrático, com redução dos valores desde a menor dose até o ponto de mínima estimado na dose de 50 $t\ ha^{-1}$, com valor de 4,86 log UFC g^{-1} , seguido de incremento nas doses subsequentes, atingindo 3,96 log UFC g^{-1} na maior dose avaliada (Figuras 5A e 5B).

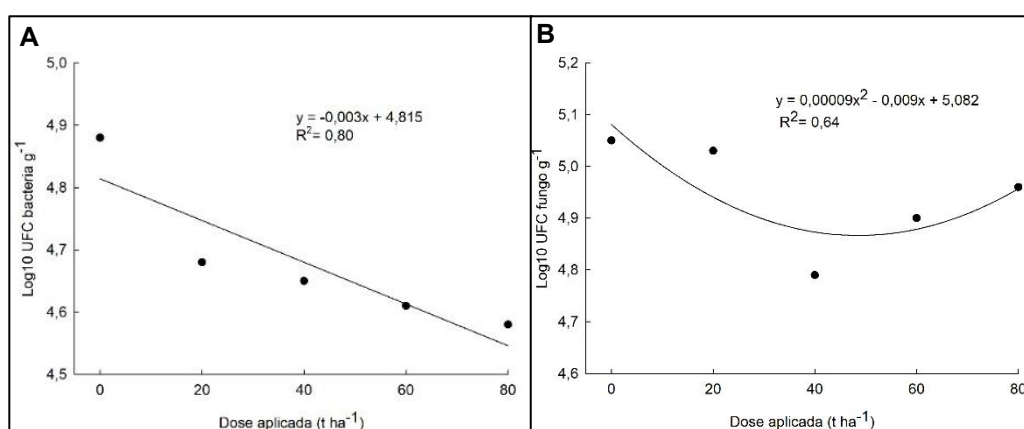


Figura 5. Unidades formadoras de colônias (UFC) no substrato ao final do experimento – Bactérias (A) e Fungos (B).

Em comparação ao tratamento controle, a população bacteriana diferiu significativamente apenas na maior dose de torta de filtro.

Para a população fúngica, o valor observado na maior dose foi superior ao controle, enquanto nas demais doses não foram observadas diferenças significativas (Tabela 6).

Tabela 6. Unidades formadoras de colônias (UFC) no substrato em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	Bactérias	Fungos
-	-----Log UFC g ⁻¹ -----	
Controle	4,83	3,79
0 t ha ⁻¹	4,88 ^{ns}	4,05 ⁺
20 t ha ⁻¹	4,67 ^{ns}	4,03 ⁺
40 t ha ⁻¹	4,65 ^{ns}	3,79 ^{ns}
60 t ha ⁻¹	4,61 ^{ns}	3,90 ^{ns}
80 t ha ⁻¹	4,58 ⁻	3,96 ⁺
CV(%)	2,55	1,90

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

A redução da população bacteriana na maior dose de torta de filtro pode estar associada ao aumento da atividade metabólica da microbiota total, em função do maior aporte de matéria orgânica, intensificando a competição por recursos nutricionais no substrato. Nessas condições, a maior disponibilidade de carbono e nutrientes pode favorecer determinados grupos microbianos em detrimento de outros, alterando características da rizosfera, como pH, influxo de carbono, disponibilidade hídrica e dinâmica de nutrientes (Kuzyakov e Domanski, 2000, Priya et al., 2021).

Resultados semelhantes foram observados por González et al. (2014), que, ao avaliarem a aplicação de torta de filtro isolada na dose de 25 t ha⁻¹, com teor de 29,6% de matéria orgânica, constataram redução da população bacteriana aos 90 dias após a aplicação, em relação às avaliações realizadas aos 30 e 60 dias, indicando que, mesmo em doses moderadas, pode ocorrer competição microbiana e redução populacional ao longo do tempo.

Para a população fúngica, a redução observada até doses intermediárias de torta de filtro pode estar relacionada à competição com a população bacteriana por nutrientes disponíveis no substrato. Em doses mais elevadas, o maior aporte de matéria orgânica pode ter favorecido o desenvolvimento de fungos saprófitos, promovendo a recuperação e o aumento da população fúngica. González et al. (2014) também observaram redução da UFC de fungos aos 90 dias após a aplicação de torta de filtro, embora tenham constatado incremento de microrganismos solubilizadores de fosfato no mesmo período.

O ecossistema rizosférico abriga diferentes grupos de organismos, como bactérias fixadoras de N, bactérias solubilizadoras de P, fungos micorrízicos arbusculares, macroinvertebrados, protozoários e patógenos do solo, que competem pela matéria orgânica disponível (Mendes et al., 2015). Nesse contexto, os dados sugerem a existência de uma faixa ótima de doses de torta de filtro capaz de estimular o crescimento fúngico até um limite mínimo, a partir do qual a população tende a se recuperar com o aumento do aporte orgânico.

Teores de nutrientes foliar na folha “D”

Os teores de N, P, K e Ca na folha “D” foram influenciados pela aplicação das doses de torta de filtro, ajustando-se a modelos lineares de regressão. O teor de N amoniacal aumentou com o incremento das doses, apresentando acréscimo de 20,45% em relação à dose de 0 t ha⁻¹, atingindo valor máximo de 10,6 g kg⁻¹.

Os teores de P também aumentaram de forma linear, com incremento de 41,83% entre a menor e a maior dose, variando de 2,08 a 2,95 g kg⁻¹. Em contraste, os teores de K decresceram com o aumento das doses, apresentando redução de 23,92% em relação à dose de 0 t ha⁻¹, com valor máximo de 11,54 g kg⁻¹.

O Ca apresentou incremento linear, com aumento de 21,18% na maior dose em relação à ausência de torta de filtro, atingindo valor máximo de 7,12 g kg⁻¹. Os teores de Mg e S não foram influenciados pelas doses aplicadas, apresentando valores médios de 4,5 e 1,74 g kg⁻¹, respectivamente (Figuras 6A e 6B).

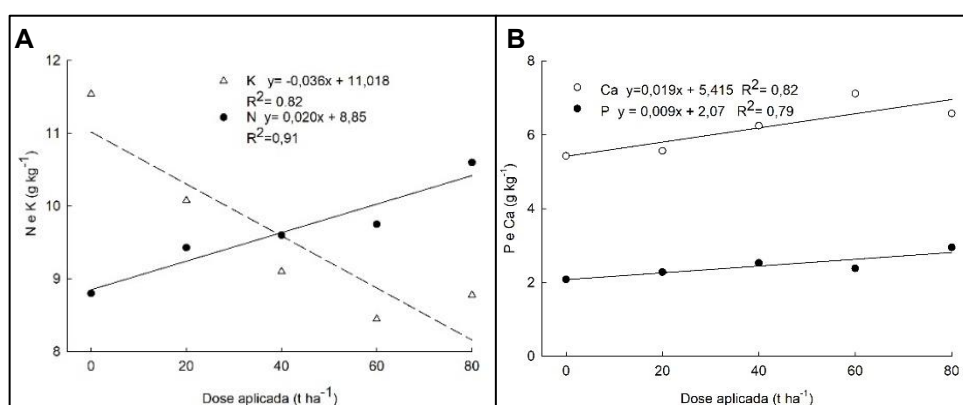


Figura 6. Teores de Nitrogênio (N) e Potássio (K) (A), e Cálcio (Ca) e Fósforo (P) (B) na folha “D” de plantas de abacaxi fertilizadas com torta de filtro, aos 220 dias após o plantio.

Na comparação com o tratamento com fertilização mineral, os teores de N na folha “D” foram inferiores ao controle, com exceção da maior dose de torta de filtro, que não diferiu significativamente do controle.

Para P, os teores foram inferiores ao controle na menor dose e superiores na maior dose avaliada. Em todas as doses, os teores de K foram inferiores ao controle.

O Ca apresentou teor superior ao controle apenas na dose de 60 t ha⁻¹, enquanto os teores de Mg e S não diferiram significativamente do controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 7).

Tabela 7. Teores de macronutrientes na folha “D” do abacaxizeiro ‘BRS Imperial’ em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
Controle	12,15	2,53	14,46	5,46	4,27	1,73
0 t ha ⁻¹	8,80 ⁻	2,08 ⁻	11,54 ⁻	5,43 ^{ns}	4,70 ^{ns}	1,84 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	9,43 ⁻	2,28 ^{ns}	10,08 ⁻	5,57 ^{ns}	4,21 ^{ns}	1,69 ^{ns}
40 t ha ⁻¹	9,60 ⁻	2,53 ^{ns}	9,10 ⁻	6,25 ^{ns}	4,30 ^{ns}	1,78 ^{ns}
60 t ha ⁻¹	9,75 ⁻	2,38 ^{ns}	8,45 ⁻	7,12 ⁺	4,94 ^{ns}	1,65 ^{ns}
80 t ha ⁻¹	10,60 ^{ns}	2,95 ⁺	8,78 ⁻	6,58 ^{ns}	4,35 ^{ns}	1,76 ^{ns}
CV(%)	7,89	5,08	11,62	9,34	8,19	4,49

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

O incremento dos teores de N na folha “D” pode ser explicado pelo teor desse nutriente na torta de filtro (6,29 g kg⁻¹), contribuindo para o aumento de sua disponibilidade no sistema e, conseqüentemente, para o incremento da biomassa vegetal. Os valores observados nos tratamentos sem adubação mineral permaneceram abaixo do nível crítico para a cultura (12 g kg⁻¹), indicando deficiência de N nas condições do experimento, o que pode comprometer a produtividade e a qualidade dos frutos, caso não haja suplementação adequada (Spironello et al., 2004, Teixeira et al., 2009, Teixeira et al., 2011, Ramos et al., 2011, Oliveira et al., 2015, Souza e Oliveira, 2021). Ramos et al. (2011) relataram valores semelhantes para a folha “D” de abacaxizeiro ‘Imperial’ sob omissão de N, com teor médio de 8,70 g kg⁻¹ aos sete meses de cultivo.

Os teores de P observados no presente estudo situaram-se acima dos valores considerados adequados para a cultura, em torno de 1 g kg⁻¹, mesmo na ausência de aplicação de torta de filtro, indicando que o P disponível no substrato foi suficiente

para atender à demanda da planta (Spironello et al., 2004, Teixeira et al., 2009, Ramos et al., 2011). Esses resultados reforçam o potencial da torta de filtro como fonte alternativa de P, especialmente em solos pobres nesse nutriente ou em culturas com maior exigência fosfatada.

A redução dos teores de K na folha “D” com o aumento das doses pode estar associada ao baixo teor desse nutriente na torta de filtro ($2,93 \text{ g kg}^{-1}$) e à interação antagônica com Ca, cuja concentração foi elevada no sistema. Esse efeito de inibição competitiva já foi relatado em condições semelhantes por Moreira et al. (1999), Medeiros et al. (2008), Silva e Trevizam (2015) e Lange et al. (2021). Os valores observados são compatíveis com aqueles encontrados por Ramos et al. (2011) em condições de omissão de K, indicando deficiência desse nutriente nas plantas avaliadas, o que pode resultar em redução da fotossíntese e do crescimento vegetal (Gomes et al., 2022). Contudo, não foram observados sintomas visuais de deficiência nas plantas.

O incremento dos teores de Ca na folha “D” reflete o elevado teor desse nutriente na torta de filtro ($12,95 \text{ g kg}^{-1}$), resultando em valores superiores aos de referência para a cultura ($4,0 \text{ g kg}^{-1}$) (Teixeira et al., 2009). Para Mg, os teores observados permaneceram acima dos valores de referência, possivelmente em função do antagonismo com K, uma vez que a redução da absorção de potássio pode favorecer a absorção de Ca e Mg (Malavolta et al., 1997). A ausência de resposta de S às doses aplicadas, aliada à semelhança com valores reportados na literatura, indica suprimento adequado desse nutriente nas condições avaliadas (Ramos et al., 2011).

Os teores de B, Fe, Mn e Zn na folha “D” não apresentaram diferença significativa em função das doses de torta de filtro. O teor médio de B foi de $20,55 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto Fe apresentou média de $70,12 \text{ mg kg}^{-1}$. Para Zn, a média foi de $7,65 \text{ mg kg}^{-1}$, e para Mn, de $172,3 \text{ mg kg}^{-1}$, indicando que o incremento das doses do resíduo não promoveu alterações expressivas nos teores desses micronutrientes na folha “D”.

Na comparação com o tratamento com adubação convencional, apenas o teor de B na dose de 0 t ha^{-1} foi inferior ao controle. Para os demais micronutrientes avaliados (Fe, Mn e Zn), não foram observadas diferenças significativas em relação à testemunha em nenhuma das doses aplicadas (Tabela 8).

Tabela 8. Teores de micronutrientes na folha “D” do abacaxizeiro ‘BRS Imperial’ em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	B	Fe	Mn	Zn
-----mg kg ⁻¹ -----				
Controle	22,00	71,33	168,50	8,00
0 t ha ⁻¹	17,25 ⁻	74,33 ^{ns}	178,00 ^{ns}	8,50 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	21,75 ^{ns}	70,00 ^{ns}	174,25 ^{ns}	7,25 ^{ns}
40 t ha ⁻¹	21,75 ^{ns}	69,50 ^{ns}	172,50 ^{ns}	7,25 ^{ns}
60 t ha ⁻¹	21,25 ^{ns}	73,75 ^{ns}	178,00 ^{ns}	8,00 ^{ns}
80 t ha ⁻¹	20,75 ^{ns}	63,00 ^{ns}	158,75 ^{ns}	7,25 ^{ns}
CV(%)	11,31	10,43	11,38	9,35

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

Os teores médios de B observados no presente estudo foram superiores aos relatados por Spironello et al. (2004), que encontraram valores entre 7,3 e 9,2 mg kg⁻¹, e situaram-se dentro da faixa reportada por Ramos et al. (2011), entre 18,4 e 30,5 mg kg⁻¹.

Para Fe, a média geral de 70,12 mg kg⁻¹ foi semelhante à observada no abacaxizeiro ‘Smooth Cayenne’, cujos valores variaram de 65,9 a 83,9 mg kg⁻¹ (Spironello et al., 2004). O Zn apresentou valores compatíveis com a faixa de 6,2 a 7,7 mg kg⁻¹ descrita por Spironello et al. (2004).

Por outro lado, Mn apresentou média inferior àquela relatada pelo mesmo autor, que variou de 208 a 454 mg kg⁻¹. De forma geral, os resultados indicam que a aplicação da torta de filtro não interferiu significativamente na nutrição da planta em relação a esses micronutrientes, mantendo os teores foliares dentro das faixas reportadas na literatura.

Crescimento vegetal

O crescimento das mudas de abacaxizeiro foi influenciado pela aplicação de torta de filtro, com respostas significativas para a matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR), matéria seca da folha “D” (MSFD), área foliar da folha “D” (AFFD), comprimento da folha “D” (CFD), largura da folha “D” (LFD) e número de folhas (NF), todas ajustando-se a modelos lineares de regressão.

Observou-se incremento de 57,8% na MSPA até a maior dose avaliada, com valor máximo de 97,77 g na dose de 80 t ha⁻¹. A matéria seca da raiz apresentou aumento de 41,5% na maior dose em relação à menor, atingindo valor de 24,7 g.

Para os parâmetros biométricos da folha “D”, foram observados incrementos de 13,2% para o comprimento, 26,1% para a largura, 23,6% para a área foliar e 33,6% para a matéria seca. O número de folhas aumentou 14,6% na maior dose, com valor médio de 40,19 folhas (Figuras 7A, 7B e 7C).

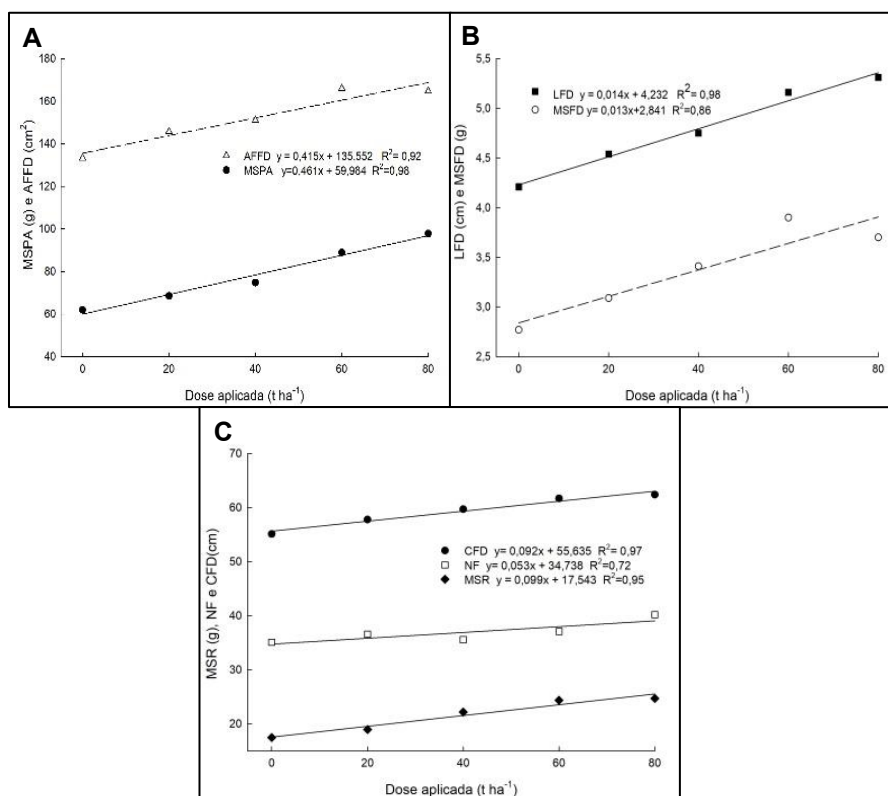


Figura 7. Variáveis de crescimento de plantas de abacaxi fertilizadas com torta de filtro, aos 220 dias - Matéria seca da parte aérea (MSPA) e área foliar da folha “D” (AFFD) (A), largura da folha “D” (LFD) e matéria seca da folha “D” (MSFD) (B) e comprimento da folha “D” (CFD), número de folhas (NF) e matéria seca da raiz (MSR) (C).

Na comparação com o tratamento controle, foram observadas diferenças significativas para a matéria seca da parte aérea (MSPA), o número de folhas (NF) e o comprimento da folha “D” (CFD).

As doses de 60 e 80 t ha⁻¹ apresentaram valores de MSPA superiores ao controle. O CFD na dose de 0 t ha⁻¹ foi inferior ao controle, enquanto as demais doses não diferiram significativamente. Para NF, a maior dose apresentou valor superior ao controle.

As variáveis matéria seca da raiz (MSR), largura da folha “D” (LFD), área foliar da folha “D” (AFFD), matéria seca da folha “D” (MSFD), diâmetro do coleto (DC) e comprimento da parte aérea (CPA) não diferiram significativamente do controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 9).

Tabela 9. Crescimento do abacaxizeiro 'BRS Imperial' em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	MSPA	MSR	MSFD	NF	DC	CPA	LFD	CFD	AFFD
	-----g-----			-	mm	-----cm-----			cm ²
Controle	71,49	17,46	3,27	34,56	29,81	66,46	4,79	62,28	155,45
0 t ha ⁻¹	61,95 ^{ns}	17,45 ^{ns}	2,77 ^{ns}	35,06 ^{ns}	29,44 ^{ns}	63,75 ^{ns}	4,21 ^{ns}	55,10 ⁻	133,31 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	68,52 ^{ns}	18,93 ^{ns}	3,09 ^{ns}	36,56 ^{ns}	29,13 ^{ns}	63,97 ^{ns}	4,54 ^{ns}	57,78 ^{ns}	145,76 ^{ns}
40 t ha ⁻¹	74,81 ^{ns}	22,20 ^{ns}	3,41 ^{ns}	35,56 ^{ns}	30,81 ^{ns}	63,53 ^{ns}	4,75 ^{ns}	59,70 ^{ns}	151,04 ^{ns}
60 t ha ⁻¹	89,00 ⁺	24,36 ^{ns}	3,90 ^{ns}	37,06 ^{ns}	31,25 ^{ns}	68,88 ^{ns}	5,16 ^{ns}	61,68 ^{ns}	165,99 ^{ns}
80 t ha ⁻¹	97,77 ⁺	24,70 ^{ns}	3,70 ^{ns}	40,19 ⁺	30,88 ^{ns}	65,26 ^{ns}	5,31 ^{ns}	62,39 ^{ns}	164,73 ^{ns}
CV(%)	9,86	18,53	10,87	5,68	4,66	4,86	6,27	4,80	7,83

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

O incremento da matéria seca da parte aérea (MSPA) com o aumento das doses de torta de filtro indica efeito positivo do resíduo sobre a produção de biomassa do abacaxizeiro. No entanto, os valores observados, mesmo nas maiores doses, foram inferiores aos relatados por Reinhardt et al. (2002) para as cultivares 'Pérola' e 'Smooth Cayenne' aos 18 meses de plantio, o que pode ser atribuído ao menor tempo de cultivo no presente estudo.

Para a matéria seca da raiz (MSR), o valor máximo observado foi superior ao relatado para a cultivar 'Pérola' e ligeiramente inferior ao de 'Smooth Cayenne', indicando resposta intermediária do sistema radicular à adubação com torta de filtro.

Os incrementos observados nos parâmetros biométricos da folha "D" (CFD, LFD, AFFD e MSFD) reforçam o efeito da adubação orgânica sobre o crescimento vegetativo da planta. O comprimento máximo da folha "D" foi semelhante ao relatado por Ramos et al. (2011) para o abacaxizeiro 'Imperial' aos oito meses de cultivo, porém inferior aos valores descritos para as cultivares 'Pérola', 'Smooth Cayenne' e 'Gold', possivelmente em função do estágio fenológico e do manejo nutricional adotado (Reinhardt et al., 2002, Martins e Ventura, 2011). Resultados semelhantes foram observados para a largura e a matéria seca da folha "D", cujos valores permaneceram inferiores aos relatados para cultivares submetidas a maiores aportes de N e K.

O aumento do número de folhas (NF) observado na maior dose de torta de filtro reflete a intensificação da fase vegetativa da planta, caracterizada pelo maior acúmulo de biomassa foliar e expansão do dossel, conforme descrito por Fassinou Hotegni et al. (2014). Apesar disso, os valores observados foram inferiores aos

relatados por Ramos et al. (2011) para a cultivar 'BRS Imperial' em solução nutritiva, indicando limitação no crescimento vegetativo.

A ausência de resposta significativa do diâmetro do coleto (DC) e do comprimento da parte aérea (CPA), bem como os valores de crescimento inferiores aos relatados na literatura, podem estar associados à deficiência de N (observada nas plantas sem adubação convencional), nutriente essencial para o crescimento vegetal, conforme discutido no tópico anterior.

CONCLUSÕES

A torta de filtro demonstrou ser uma fonte relevante para a fertilização e nutrição do abacaxizeiro, apresentando respostas positivas dependentes da dose aplicada. De modo geral, doses entre 20 e 40 t ha⁻¹ promoveram os melhores resultados entre as variáveis avaliadas, sendo a dose de 40 t ha⁻¹ a que apresentou o melhor desempenho global, conciliando a melhoria da fertilidade do substrato com adequada resposta nutricional e crescimento das plantas.

Contudo, as limitações observadas para alguns nutrientes, especialmente K, bem como a redução da população microbiana em doses mais elevadas, evidenciam a necessidade do uso da torta de filtro em combinação com outras fontes, como resíduos orgânicos, biofertilizantes ou suplementos minerais, visando equilibrar a nutrição vegetal e manter a atividade biológica do substrato.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo fomento à pesquisa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo-Gómez, R., Sánchez-Hernández, M., Gómez-Merino, F., Ponce-Peña, P., González-Lozano, M.A., Navarro-Moreno, L., Poisot, M. (2020) Soil quality of *Ananas comosus* cultivation land in the Papaloapan Basin region of Mexico after wastes addition as fertilizer supplement. *Agriculture*, 10:173-1. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050173>.
- Ali, A.M., Hegab, S.A., Abd El Gawad, A.M., Awad, M. (2022) Integrated effect of filter mud cake combined with chemical and biofertilizers to enhance potato growth and its yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22:455-464. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00661-3>.
- Aquino, A.M. de, Oliveira, A.M.G., Loureiro, D.C. (2005) Integrando compostagem e vermicompostagem na reciclagem de resíduos orgânicos domésticos. *Circular Técnica* 12. Embrapa, 1p.
- Barros, F.C. da, Camargo, R. de, Lemes, E.M., Lana, R.M.Q., Almeida, R.F. de, Moraes, E.R. de (2019) Biosolid and sugarcane filter cake in the composition of organomineral fertilizer on soybean responses. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8:131-137. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0237-3>.
- Bettiol, W., Silva, C. A., Cerri, C. E. P., Martin Neto, L., Andrade, C. A. de. (2023) Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa, 788 p.
- Bunts, J.S., Rovira, A.D. (1995) Microbiological studies of some subantartic soils. *Journal of Soil Science*, 6:119-128.
- Cai, Z., Wang, B., Xu, M., Zhang, H., He, X., Zhang, L., Gao, S. (2015) Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 15:260-270. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0989-y>.
- Campiteli, L.L., Santos, R.M., Lazarovits, G., Rigobelo, E.C. (2018) The impact of applications of sugar cane filter cake and vinasse on soil fertility factors in fields having

four different crop rotations practices in Brazil. *Científica*, 46:42-48. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2018v46n1p42-48>.

Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Carvalho, A.J.C., Caetano, L.C.S., Vieira, M.E., Peçanha, D.A. (2021) Potassium fertilization in pineapple fruit quality. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 43:e018-1. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021018>.

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024) Crops and livestock products: pineapple production in 2023. Rome. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 22 de dez. de 2025.

Fassinou Hotegni, V.N., Lommen, W.J.M., Agbossou, E.K., Struik, P.C. (2014) Heterogeneity in pineapple fruit quality results from plant heterogeneity at flower induction. *Frontiers in Plant Science*, 5:670-1.

Fravet, P.R.F. de, Soares, R.A.B., Lana, R.M.Q., Lana, Â.M.Q., Korndörfer, G.H. (2010) Effect of filter cake doses and method of application on yield and technological quality of sugarcane ratoon. *Ciência e Agrotecnologia*, 34:618-624. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300013>.

Ge, Y., Abdulkreem Al-Huqail, A., Zhou, Z., Ali, E.F., Ghoneim, A.M., Eissa, M., El-Sharkawy, M.S., Ding, Z. (2022) Plant growth stimulating bacteria and filter mud cake enhance soil quality and productivity of mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22:3068-3080. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00868-y>.

Gomes, M.D.P., Rezende, C.H.S., Souza, J.A., Rocha, G.C. (2022) Lixiviação de potássio em um Latossolo cultivado com café. *Irriga*, 27:597-606. <https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n3p597-606>.

Gonçalves, C.A., Camargo, R. de, Sousa, R.T.X. de, Soares, N.S., Oliveira, R.C. de, Stanger, M.C., Lana, R.M.Q., Lemes, E.M. (2021) Chemical and technological attributes of sugarcane as a function of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge. *PLoS ONE*, 16:e0236852-1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236852>.

Gonçalves, J.C., Neto, X.R.P., Nunes, E.H., Pecoraro, C.A., Gasparotto, F., Filho, J.T. (2023) Soybean fertilization with filter cake and its effects on soil chemical attributes. *Semina: Ciências Agrárias*, 44:755-766. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n2p755>.

González, L.C., Prado, R.M., Hernández, A.R., Caione, G., Selva, E.P. (2014) Uso de torta de filtro enriquecida com fosfato natural e biofertilizantes em Latossolo Vermelho distrófico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44:135-141.

Jackson, M.L. (1958) *Soil chemical analysis*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 498p.

Kuzyakov, Y., Domanski, G. (2000) Carbon input by plants into the soil: review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163:421-431. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R).

Lange, A., Cavalli, E., Pereira, C.S., Chapla, M.V., Freddi, O.S. (2021) Calcium: magnesium ratio and chemical characteristics of soil under crop of soy and corn. *Nativa*, 9:294-301. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i3.11526>.

Loures, D.S. da, Yamashita, O.M., Carvalho, M.A.C. de, Koga, P.S., Campos, O.R., Massaroto, J.A., Arantes, K.R., Felito, R.A., Gervazio, W., Rocha, A.M. da, Cândido, A.C.F.T. (2021) Cultivo do abacaxizeiro em função do parcelamento da adubação potássica de cobertura. *Research, Society and Development*, 10:e42510716722-1. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16722>.

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de (1997) *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba: POTAFOS.

Marschner, P. (2012) *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. New York: Academic Press, 651p.

Martin, J.P. (1950) Use of acid, rose Bengal, and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Science*, 69:215-232.

Martins, A.G., Ventura, J.A. (2011) Adubação N-P-K e o desenvolvimento, produtividade e qualidade dos frutos do abacaxi 'Gold' (MD-2). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1367-1376. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400031>.

Medeiros, J.C., Albuquerque, J.A., Mafra, Á.L., Dalla Rosa, J., Gatiboni, L.C. (2008) Relação cálcio: magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. *Semina: Ciências Agrárias*, 29:799-806.

Mendes, L.W., Tsai, S.M., Navarrete, A.A., Hollander, M. de, Veen, J.A. van, Kuramae, E.E. (2015) Soil-borne microbiome: linking diversity to function. *Microbial Ecology*, 70:255-265. <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0559-2>.

Miyazawa, M., Pavan, M.A., Muraoka, T., Carmo, C.A.F.S., Melo, W.J. (2009) Análise química de tecido vegetal. In: Silva, F.C. da (ed.) *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.191-233.

Mohd Ali, M., Hashim, N., Abd Aziz, S., Lasekan, O. (2022) Shelf-life prediction and kinetics of quality changes in pineapple (*Ananas comosus*) varieties at different storage temperatures. *Horticulturae*, 8:992-1. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8110992>.

Moreira, A., Carvalho, J.G. de, Evangelista, A.R. (1999) Influência da relação cálcio: magnésio do corretivo na nodulação, produção e composição mineral da alfafa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34:249-255. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200014>.

Neves, L.S. das, Ernani, P.R., Simonete, M.A. (2009) Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:25-32. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100003>.

Oliveira, A.M.G., Natale, W., Rosa, R.C.C., Junghans, D.T. (2015) NK fertilization in 'BRS Imperial' pineapple – II – variables of plant production. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37:764-773. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-024/14>.

Omotoso, S.O., Akinrinde, E.A. (2013) Effect of nitrogen fertilizer on some growth, yield and fruit quality parameters in pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) plant at Ado-Ekiti Southwestern, Nigeria. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 3. Disponível em: <http://www.interestjournals.org/IRJAS>. Acesso em: 22 de dez. de 2025.

Peters, J.B. (2005) Wisconsin procedures for soil testing, plant analysis and feed and forage analysis: plant analysis. Madison: University of Wisconsin Extension. 304p. Disponível em: <https://datcp.wi.gov/Documents/NMProcedures.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

Priya, P., Aneesh, B., Harikrishnan, K. (2021) Genomics as a potential tool to unravel the rhizosphere microbiome interactions on plant health. *Journal of Microbiological Methods*, 185:106215-1.

Ramos, M.J.M., Monnerat, P.H., Pinho, L.G. da R., Silva, J.A. da (2011) Deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro 'Imperial': composição mineral. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33:261-271. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000032>.

Reinhardt, D.H., Cabral, J.R.S., Souza, L.F. da S., Sanches, N.F., Matos, A.P. (2002) Les cultivars 'Pérola' et 'Cayenne lisse' dans l'état de Bahia au Brésil: croissance, floraison, parasites, maladies, rendement et qualité du fruit. *Fruits*, 57:43-53. <https://doi.org/10.1051/fruits:2002005>.

Ronquim, C.C. (2010) Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite.

Silva, J.H.B. da, Nascimento, M.A. do, Silva, A.V. da, Neto, F.P., Araújo, J.R.E.S., Silva, J.M. da, Silva, A.J. da, Mielezrski, F. (2021) Brotação inicial, teor de sólidos solúveis e índice de maturação da cana-de-açúcar submetida à adubação com torta de filtro enriquecida. *Brazilian Journal of Development*, 7:32575-32592. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-805>.

Silva, L.G., Camargo, R. de, Lana, R.M.Q., Delvaux, J.C., Fagan, E.B., Machado, V.J. (2020) Biochemical changes and development of soybean with use of pelletized organomineral fertilizer containing sewage sludge and filter cake. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 42:e44249-1. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.44249>.

Silva, M.L. de S., Trevizam, A.R. (2015) Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. Piracicaba: IPNI, p. 8-18.

Sobral, L.F., Barreto, M.C. de V., Silva, A.J. da, Anjos, J.L. dos (2015) Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 13p.

Souza Júnior, I.T. de, Jardini, D.C., Bezerra, C.E., Nunes, G.N. (2024) Prospecção de bactérias solubilizadoras de fósforo, promotoras de crescimento de plantas de soja e biocontroladoras do fungo *Sclerotinia sclerotiorum*. Connection Line – Revista Eletrônica do UNIVAG, 31:e2542-1. <https://doi.org/10.18312/connectionline.v31i31.2542>.

Souza, L.F. da S., Oliveira, A.M.G. (2021) Calagem e adubação para o abacaxizeiro. In: Borges, A.L. (ed.) Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.95-122.

Souza, L.F. da S., Reinhardt, D.H. (2007) Pineapple. In: Crisótomo, L.A., Naumov, A., Johnston, A.E. (eds.) Fertilizing for high yield and quality tropical fruits of Brazil. Horgen: International Potash Institute, p.179-201.

Spironello, A., Quaggio, J.A., Teixeira, L.A.J., Furlani, P.R., Sigrist, M.M. (2004) Pineapple yield and fruit quality affected by NPK fertilization in a tropical soil. Revista Brasileira de Fruticultura, 26:155-159. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452004000100041>.

Sposito, G. (1989) The chemistry of soils. New York: Oxford University Press. 277p.

Stevenson, F.J. (1994) Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley & Sons. 496p.

Teixeira, L.A.J., Quaggio, J.A., Cantarella, H., Mellis, E.V. (2011) Potassium fertilization for pineapple: effects on soil chemical properties and plant nutrition. Revista Brasileira de Fruticultura, 33:627-636. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000200036>.

Teixeira, L.A.J., Quaggio, J.A., Zambrosi, F.C.B. (2009) Preliminary DRIS norms for ‘Smooth Cayenne’ pineapple and derivation of critical levels of leaf nutrient concentrations. Acta Horticulturae, 822:131-138.

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (2017) Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Brasília: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 22 de dez. de 2025.

Weifeng, Z., Weixiu, Y., Zhiling, M., Xiaoyan, Z., Ligu, C., Shenghui, L., Yanfang, Z. (2020) Effects of time and height of shading on yield and quality of pineapple. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 512:012101-1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/512/1/012101>.

Werle, R., Garcia, R.A., Rosolem, C.A. (2008) Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:2297-2305. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600009>.

3.2. COMPOSTO DE LODO DE ETE NA FERTILIDADE E MICROBIOTA DO SUBSTRATO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO ABACAXIZEIRO 'IMPERIAL'

RESUMO

O uso de resíduos orgânicos na agricultura tem se destacado como alternativa para a redução do uso de fertilizantes minerais e para a mitigação de impactos ambientais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de doses de um composto orgânico produzido a partir de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) sobre a fertilidade e a microbiota do substrato, bem como sobre o crescimento e a nutrição do abacaxizeiro 'BRS Imperial'. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, com cinco doses do composto (0, 5, 10, 15 e 20 t ha⁻¹) e um tratamento controle com adubação mineral, totalizando seis tratamentos e quatro repetições. Aos 220 dias após o plantio, foram avaliados atributos químicos e microbiológicos do substrato, crescimento vegetal e teores nutricionais na folha "D". A aplicação do composto promoveu aumento linear do teor de matéria orgânica e dos teores de fósforo (P), cálcio (Ca), zinco (Zn) e manganês (Mn) no substrato, enquanto o potássio (K) apresentou menores teores em relação ao controle. A população microbiana não diferiu entre as doses, porém foi superior à observada no manejo mineral, especialmente para bactérias. O crescimento das plantas foi favorecido pelas doses do composto, com incrementos lineares em variáveis relacionadas à biomassa e à área foliar. Os teores foliares de micronutrientes apresentaram respostas quadráticas, com valores máximos em doses intermediárias, enquanto os macronutrientes mantiveram-se, em sua maioria, dentro das faixas de suficiência. Os resultados indicam que o composto de lodo de ETE apresenta potencial para uso na adubação do abacaxizeiro, especialmente quando aplicado em doses entre 5 e 10 t ha⁻¹, promovendo melhorias na fertilidade do substrato, no crescimento vegetal e na nutrição das plantas.

Palavras-chave: *Ananas comosus* (L.) Merrill; biossólidos; nutrição vegetal; microbiota do solo; fertilidade do solo.

SEWAGE SLUDGE COMPOST EFFECTS ON SUBSTRATE FERTILITY AND MICROBIOTA, GROWTH AND NUTRITION OF 'BRS IMPERIAL' PINEAPPLE

ABSTRACT

The use of organic residues in agriculture has gained attention as an alternative to reduce mineral fertilizer inputs and mitigate environmental impacts. In this context, this study aimed to evaluate the effects of applying different doses of a compost produced from sewage treatment plant sludge (STS) on substrate fertility and microbiota, as well as on the growth and nutritional status of 'BRS Imperial' pineapple plants. The experiment was conducted under greenhouse conditions in a randomized block design, with five compost doses (0, 5, 10, 15 and 20 t ha⁻¹) and one control treatment with conventional mineral fertilization, totaling six treatments and four replications. At 220 days after planting, chemical and microbiological attributes of the substrate, plant growth parameters, and nutrient contents in the "D" leaf were evaluated. Compost application promoted a linear increase in organic matter content and in the availability of P, Ca, Zn and Mn in the substrate, while potassium levels were lower compared to the control treatment. Microbial populations did not differ among compost doses; however, bacterial counts were higher than those observed under mineral fertilization. Plant growth was positively affected by compost application, with linear increases in biomass-related variables and leaf area. Leaf micronutrient contents showed quadratic responses, with maximum values at intermediate compost doses, whereas most macronutrients remained within adequate ranges for the crop. Overall, the results indicate that sewage sludge compost has potential for use in pineapple fertilization, particularly when applied at rates between 5 and 10 t ha⁻¹, promoting improvements in substrate fertility, plant growth, and plant nutrition.

Keywords: *Ananas comosus* (L.) Merrill; biosolids; plant nutrition; soil microbiota; soil fertility

INTRODUÇÃO

O abacaxi (*Ananas comosus* L. Merrill) é uma fruta tropical importante, reconhecida por seu sabor doce e valor nutricional (Nkolisa et al., 2025). Característico de regiões tropicais e subtropicais, é amplamente consumido em todo o mundo, tanto na forma *in natura* quanto processada (Weifeng et al., 2020). Entre as frutas tropicais, o abacaxi ocupa posição de destaque, devido às suas qualidades sensoriais, como aroma, cor e sabor marcantes, sendo a terceira fruta tropical mais demandada globalmente, atrás apenas da banana e dos citros, com crescente participação no mercado internacional (Mohd Ali et al., 2022, Abraham et al., 2023).

Em 2023, a produção global ultrapassou 29 milhões de toneladas, sendo Indonésia, Filipinas, Costa Rica, Brasil e China os principais países produtores, com volumes aproximados de 3,16; 2,94; 2,94; 2,39 e 2,1 milhões de toneladas, respectivamente (FAOSTAT, 2024).

O cultivo do abacaxizeiro apresenta elevada demanda nutricional, a qual pode variar conforme as condições edafoclimáticas, o manejo empregado, a cultivar utilizada, a densidade de plantio e o destino da produção, seja para consumo *in natura* ou processamento industrial (Loures et al., 2021). Entre os macronutrientes, o potássio (K) e o nitrogênio (N) destacam-se por serem os mais absorvidos pela planta. O N exerce papel fundamental no incremento do peso e do tamanho dos frutos, enquanto o K está associado principalmente à melhoria dos atributos físico-químicos de qualidade (Omotoso e Akinrinde, 2013, Cunha et al., 2021).

Tradicionalmente, essa elevada demanda nutricional tem sido suprida pelo uso intensivo de fertilizantes minerais, prática que, embora favoreça a produtividade, acarreta custos crescentes e potenciais impactos ambientais (Gunawardena et al., 2024). Diante da elevação no preço dos fertilizantes e da necessidade de sistemas agrícolas mais sustentáveis, alternativas como o uso de fertilizantes orgânicos têm sido amplamente discutidas e incentivadas em diversos países (Liao et al., 2025). Nesse contexto, promover o uso racional e tecnicamente embasado desses insumos é fundamental para elevar a produtividade e a qualidade das culturas, ao mesmo tempo em que se reduz a poluição ambiental e se favorece a reciclagem de nutrientes (Maroušek et al., 2016).

O lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) apresenta-se como uma alternativa estratégica para enfrentar tanto os desafios ambientais quanto os

econômicos. Frequentemente considerado um subproduto problemático devido ao seu volume e potencial contaminante, quando submetido a tratamento adequado, pode apresentar características favoráveis, como teores relevantes de matéria orgânica e nutrientes, possibilitando sua utilização agrícola (Tontti et al., 2017, Comineti et al., 2025). Estudos com o uso de lodo de ETE tratado têm demonstrado resultados positivos em culturas como cana-de-açúcar, feijão-vagem e rabanete (Abdul Khaliq et al., 2017, Silva et al., 2024).

No entanto, ainda são escassas as pesquisas que avaliem os efeitos do lodo de ETE em frutíferas tropicais, especialmente no abacaxizeiro. Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a fertilidade e a microbiota do substrato, bem como o crescimento e a nutrição do abacaxizeiro 'BRS Imperial' submetido a doses de um composto orgânico produzido a partir de lodo de ETE.

Parte-se da hipótese de que o uso de composto orgânico proveniente de lodo de ETE, após adequado tratamento, seja capaz de promover melhorias na fertilidade e na dinâmica microbiológica do substrato, refletindo positivamente no desempenho agrônomo do abacaxizeiro. Espera-se que a cultura responda de forma diferenciada às doses aplicadas, com maior eficiência em níveis intermediários, enquanto aplicações mais elevadas podem não resultar em ganhos proporcionais e, eventualmente, provocar desequilíbrios nutricionais no sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Unidade de Apoio à Pesquisa do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), no município de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil (21°45'S e 41°17'W, a 11 m de altitude), em casa de vegetação, entre os meses de janeiro e agosto de 2024.

Nesse período, a temperatura máxima diária no interior da casa de vegetação variou entre 38 e 49°C, enquanto a mínima variou entre 15 e 22°C. Os dados foram obtidos por meio de registrador de dados HOBO® Data Logger Pro v2 (Onset Headquarters, Bourne, MA, EUA) (Figura 1).

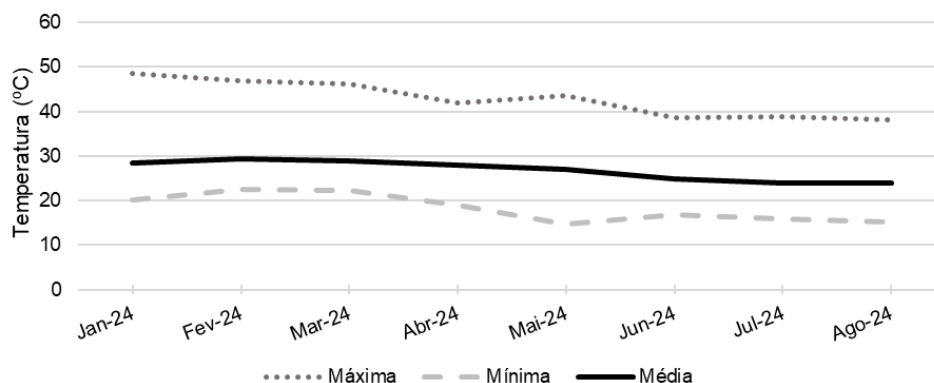


Figura 1. Temperatura máxima, mínima e média da casa de vegetação (Data Logger HOBO® pro v2) de janeiro a agosto de 2024, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Delineamento e condução do experimento

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), com cinco doses do composto orgânico de ETE (0, 5, 10, 15 e 20 t ha⁻¹) e um tratamento adicional (controle), totalizando seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos com composto foram conduzidos sem complementação mineral, enquanto o tratamento controle recebeu adubação mineral conforme recomendado por Souza e Oliveira (2021).

Ao todo, foram utilizadas 24 unidades experimentais, sendo cada unidade composta por dois vasos, contendo duas mudas de abacaxizeiro cada.

Foram utilizadas mudas do abacaxizeiro 'BRS Imperial', obtidas no município de São Francisco de Itabapoana (RJ), classificadas quanto ao peso, altura, número de folhas (NF) e diâmetro do coleto (DC). As mudas apresentaram, em média, 127 g, 40 cm de altura, 26 folhas e 20 mm de diâmetro do coleto. Após a classificação, foram agrupadas por peso e distribuídas de forma homogênea entre os blocos e tratamentos.

Para o plantio, foram utilizados vasos com volume de 18,5 dm³, preenchidos com 16 dm³ de uma mistura de Argissolo Amarelo Distrófico, coletado em subsuperfície, e areia, na proporção de 1:1 (v/v), além de 2 dm³ de brita nº 1 no fundo dos vasos para facilitar a drenagem. O solo foi coletado na Escola Técnica Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes (21°45'S e 41°20'W, a 10 m de

altitude), a aproximadamente 12 km da UENF, enquanto a areia foi obtida em areal comercial do mesmo município.

Foi realizada a caracterização química e granulométrica do substrato conforme Teixeira et al. (2017), sendo este classificado como franco-arenoso (Tabela 1). Posteriormente, procedeu-se à calagem, com aplicação de $0,44 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT = 98%), com o objetivo de elevar a saturação por bases (V%) para 60% (Teixeira et al., 2017).

Tabela 1. Características físico-químicas do substrato utilizado no experimento

pH – H ₂ O	S-SO ₄	P	K	Ca	Mg	H+Al	C	MO	CTC
-	-----mg dm ⁻³ -----			-----mmol _c dm ⁻³ -----			g dm ⁻³	dag kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³
5,2	10	5	1,20	16,30	14,40	29,20	7,20	1,24	62,0
SB	V	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Areia	Silte	Argila
mmol _c dm ⁻³	%			-----mg dm ⁻³ -----				-----%-----	
32,80	53	160,61	1,07	2,98	28,46	0,10	66,3	16,5	17,2

pH em água; P; Na; K; Fe; Zn; Mn; Cu – Extrator: Mehlich 1, Ca; Mg; Al- Extrator: KCl 1 mol L⁻¹, H+Al – Extrator: Acetato de Cálcio 0,5 mol L – pH 7,0, B – Extrator: Água quente; S - Extrator: Fosfato monoácido, SB - Soma de bases trocáveis, CTC – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0, V - Índice de saturação de bases, C- Carbono orgânico, MO – Matéria orgânica = C. Org x 1,724 – Walkley-Black.

O composto orgânico de ETE utilizado foi obtido a partir de lodo de esgoto previamente compostado e estabilizado, proveniente da estação de tratamento de esgoto (ETE) da Esplanada, operada pela concessionária Águas do Paraíba, no município de Campos dos Goytacazes, RJ. O processo de compostagem, incluindo as etapas de manejo, revolvimento e os critérios de estabilização do material, encontra-se descrito em Rodrigues (2023).

No presente estudo, o composto foi utilizado conforme recebido, sem a realização de etapas adicionais de compostagem ou tratamento. Simultaneamente ao recebimento, foi coletada uma amostra para a determinação dos teores de nutrientes, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) (Tabela 2).

Tabela 2. Características químicas do composto de lodo de ETE

pH – H ₂ O	PMS	N	P	K	Ca	Mg	S
-	%	-----g kg ⁻¹ -----					
4,6	82,40	3,54	3,36	1,26	7,75	1,71	1,24
Cu	Mo	Ni	Zn	B	Mn	Fe	
-----mg kg ⁻¹ -----							
41,70	nd	6,00	216,00	10,00	119,40	12080,40	

pH em água; N total: Kjeldahl; PMS - Percentual de massa sólida: NBR 6457/2016; P, K, Ca, Ms e S: ICP-MS EPA 6020 B / 200.8; nd- não detectável

Após o plantio das mudas, os vasos foram irrigados diariamente por meio de sistema de gotejamento, com vazão de 1,2 L h⁻¹ durante 15 minutos, conforme recomendado para a cultura do abacaxizeiro (Souza e Reinhardt, 2007).

Foram realizadas três adubações no tratamento controle, conforme recomendado por Souza e Oliveira (2021) para o abacaxizeiro irrigado, com base na análise de solo. A primeira adubação foi realizada aos 30 dias após o plantio, com aplicação de 60, 52,4 e 83 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), respectivamente; a segunda, aos 120 dias após o plantio, com 80 e 83 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente; e a terceira, aos 180 dias após o plantio, com 90 e 91,3 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente.

Os fertilizantes utilizados foram ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, como fontes de N, P e K, respectivamente.

Aos 220 dias após o plantio das mudas, foi realizada a coleta do experimento, seguida das análises biométricas, nutricionais e de fertilidade e microbiologia do substrato.

Análise química do substrato

Ao final do experimento, foi realizada a análise química do substrato. A coleta foi efetuada em cada vaso com o uso de amostrador do tipo sonda, ao longo do perfil, a 2 cm de distância da borda. Foram retiradas duas amostras simples por vaso, que foram posteriormente homogeneizadas, originando uma amostra composta por unidade experimental.

Foram determinados o pH em água (pH H₂O), a matéria orgânica (MO), a acidez potencial (H + Al), a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions

efetiva (t), a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T), a saturação por bases (V%) e os teores de P, S, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn, Zn e cobre (Cu), conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Contagem da população microbiana

Foi realizada a quantificação da população microbiana do substrato ao final do experimento, empregando-se o método de contagem de unidades formadoras de colônias (UFC). Esse método consiste na inoculação de uma suspensão do substrato em placas de Petri estéreis contendo meio de cultura de Bunts e Rovira (1995), com pH 6,8, para bactérias, e meio de Martin (1950), com pH 6,0, para fungos, ambos ajustados antes da autoclavagem (Martin, 1950).

Inicialmente, foram coletadas quatro amostras por vaso, a 5 cm da borda e 10 cm de profundidade, totalizando oito amostras simples por unidade experimental, as quais foram homogeneizadas, originando uma amostra composta. As amostras foram mantidas sob refrigeração a 4°C por 15 dias.

Após esse período, foram peneiradas em malha de 2 mm e separadas duas subamostras de 10 g: uma destinada à determinação da massa de solo seco (secagem por 72h a 100°C) e outra utilizada para a diluição seriada. Em seguida, o material foi transferido para frascos Erlenmeyer contendo 90 mL de solução salina esterilizada (0,85%), iniciando-se a série de diluições.

Posteriormente, foram realizadas as inoculações em placas de Petri, em triplicata, utilizando-se 0,1 mL das diluições de 10^{-1} a 10^{-6} para bactérias e de 10^{-1} a 10^{-5} para fungos.

As culturas foram incubadas em câmara tipo BOD a 28°C por 48h para bactérias e 120h para fungos. Após a incubação, foram selecionadas as diluições de 10^{-3} e 10^{-1} para bactérias e fungos, respectivamente, por apresentarem contagens dentro da faixa recomendada pela literatura (30 a 300 colônias por placa).

A quantificação dos microrganismos foi expressa em unidades formadoras de colônias por grama de solo (UFC g⁻¹), conforme apresentado na Equação 1.

$$\text{UFC g}^{-1}\text{de solo} = \frac{[\text{N}^{\circ} \text{ de colônias} \times \left(\frac{1}{\text{diluição}}\right) \times \left(\frac{1}{\text{alíquota}}\right)]}{\text{massa do solo seco}} \quad (2)$$

Quantificação dos teores nutricionais

Para a determinação dos teores nutricionais, foram utilizadas folhas “D” inteiras, previamente limpas com algodão umedecido em água deionizada e, após secagem, moídas em moinho de facas tipo Willey. Em seguida, foi pesada uma alíquota de 0,1 g para a análise dos nutrientes minerais.

Para a quantificação dos teores de nitrogênio amoniacal (N) e fósforo (P), as amostras foram submetidas à digestão sulfúrica. No extrato obtido, os teores de N foram determinados pelo método de Nessler, com leitura em espectrofotômetro Specord® a 480 nm (Jackson, 1958), e os de P, a 725 nm.

Os nutrientes potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) foram determinados após digestão aberta com ácido nítrico (HNO_3) concentrado e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O boro (B) foi determinado por digestão seca, conforme metodologias descritas por Malavolta et al. (1997) e Miyazawa et al. (2009), e determinados em plasma (ICPE-9000) Shimadzu® (Peters, 2005).

Avaliação do crescimento vegetal

Após a coleta, foram avaliados o comprimento da parte aérea (CPA), o número de folhas (NF) e o diâmetro do coleto (DC), além do comprimento (CF), largura (LF) e área foliar (AF) da folha “D”.

Em seguida, o material foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72h. Após a secagem, o material foi pesado para determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR) e matéria seca da folha “D” (MSFD).

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro–Wilk e de homogeneidade de variâncias de Bartlett, ambos a 5% de significância. Após o atendimento desses pressupostos, foi realizada a análise de variância e, quando significativos, os dados foram submetidos à análise de regressão para estimativa do modelo mais adequado.

Adicionalmente, foi aplicado o teste de Dunnett para comparação das doses com o tratamento adicional (controle), também a 5% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 4.4.2), com auxílio do pacote “Tratamentos.ad”, e os gráficos foram elaborados no software SigmaPlot (versão 14.5).

Para as populações de microrganismos, os dados foram transformados em logaritmo antes da realização da análise de variância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fertilidade do substrato

Dentre os parâmetros de fertilidade do substrato, a aplicação do composto de ETE promoveu incremento apenas no teor de matéria orgânica (MO), com ajuste linear crescente, resultando em aumento de 9,38% entre as doses de 0 e 20 t ha⁻¹ (Figura 2).

Esse aumento, embora discreto em termos absolutos, está de acordo com o esperado em avaliações de curto prazo com compostos orgânicos, nos quais a MO tende a ser uma das variáveis mais responsivas nessas condições (Paganini et al., 2024).

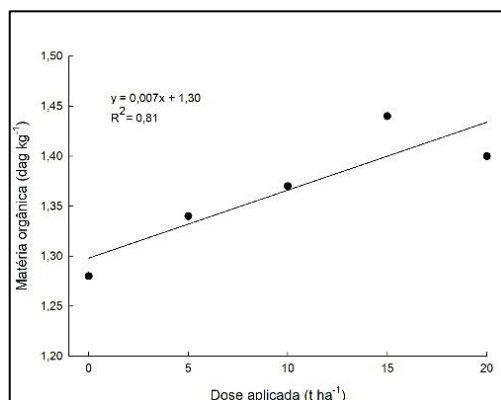


Figura 2. Teor de matéria orgânica no substrato fertilizado com composto de ETE, durante 220 dias.

Os valores de acidez potencial (H + Al), pH, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions efetiva (t), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) e saturação por bases (V%) não foram influenciados significativamente pelas doses aplicadas, apresentando valores médios de 2,77 cmolc dm⁻³; 5,43; 3,37 cmolc dm⁻³; 3,60 cmolc dm⁻³; 6,23 cmolc dm⁻³ e 53,78%, respectivamente.

Apesar de, no curto prazo e em condições de cultivo em vaso, o pH e a CTC terem se mantido estáveis, estudos conduzidos com cana-de-açúcar em solos

tropicais indicam que o uso de lodo de ETE compostado promove aumento do pH, SB, CTC e V%, além de atuar como fonte de cálcio (Ca), reduzindo a necessidade de adubação mineral (Silva et al., 2024).

Na comparação com o tratamento com adubação convencional, pelo teste de Dunnett, a SB e a CTC efetiva foram inferiores apenas na menor dose, enquanto a CTC a pH 7,0 (T) apresentou valores inferiores em todas as doses avaliadas (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros de fertilidade do substrato em função da aplicação de doses de Composto de ETE, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	pH (H ₂ O)	MO	H+Al	SB	T	T	V
	-	dag kg ⁻¹	-----cmol _c dm ⁻³ -----				%
Controle	5,35	1,31	3,10	3,89	4,16	7,16	54,10
0 t ha ⁻¹	5,48 ^{ns}	1,28 ^{ns}	2,88 ^{ns}	3,12 ⁻	3,32 ⁻	5,89 ⁻	51,41 ^{ns}
5 t ha ⁻¹	5,38 ^{ns}	1,34 ^{ns}	2,85 ^{ns}	3,34 ^{ns}	3,62 ^{ns}	6,33 ⁻	52,75 ^{ns}
10 t ha ⁻¹	5,35 ^{ns}	1,37 ^{ns}	2,80 ^{ns}	3,52 ^{ns}	3,82 ^{ns}	6,45 ⁻	54,65 ^{ns}
15 t ha ⁻¹	5,53 ^{ns}	1,44 ^{ns}	2,58 ^{ns}	3,43 ^{ns}	3,58 ^{ns}	6,13 ⁻	56,07 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	5,40 ^{ns}	1,40 ^{ns}	2,75 ^{ns}	3,42 ^{ns}	3,67 ^{ns}	6,33 ⁻	54,06 ^{ns}
CV(%)	3,63	8,44	12,49	10,28	7,95	4,36	8,27

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

O fato de a CTC a pH 7,0 (T) apresentar valores inferiores ao controle em todas as doses não indica, necessariamente, perda de qualidade do solo, podendo ser explicado pela própria natureza desse atributo, que corresponde à soma de H + Al e SB. Dessa forma, como os valores de H + Al foram menores nos tratamentos com composto e a SB não aumentou na mesma proporção, observou-se redução de T. Entretanto, a saturação por bases (V%) permaneceu semelhante ao controle, indicando que não houve perda efetiva de fertilidade, conforme também relatado por Araújo et al. (2017).

A estabilidade do pH e da CTC neste estudo pode ser explicada pelo pequeno incremento de MO no período avaliado e pelas características mineralógicas do substrato. Embora a matéria orgânica possa contribuir para o aumento da CTC por meio da adição de grupos funcionais reativos, como carboxílicos e fenólicos (Duong et al., 2013), esse efeito depende da magnitude do acúmulo de MO e da interação com a fração mineral do solo.

Em substratos com textura arenosa e predominância de minerais caulínífticos, a capacidade de retenção de cargas é naturalmente limitada, reduzindo alterações expressivas na CTC em curto prazo (Novais et al., 2007). Adicionalmente, a elevada proporção de areia no substrato pode ter contribuído para a menor retenção de cargas e nutrientes. Em contraste, Yüksel e Kavdır (2020) observaram aumento da CTC e da MO em Argissolo tratado com composto de resíduos sólidos urbanos, resultado associado ao maior acúmulo e à estabilização da matéria orgânica no solo.

Os teores de potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe) e boro (B) não variaram com a aplicação das doses do composto de ETE, apresentando médias de $0,62 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $1,03 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $5,10 \text{ mg dm}^{-3}$; $437,65 \text{ mg dm}^{-3}$ e $0,13 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente.

Por outro lado, os teores de fósforo (P), cálcio (Ca), zinco (Zn) e manganês (Mn) apresentaram incremento linear, com aumentos de até 12,28%, 12,98%, 37,86% e 8,44%, respectivamente (Figuras 3A, 3B, 3C e 3D).

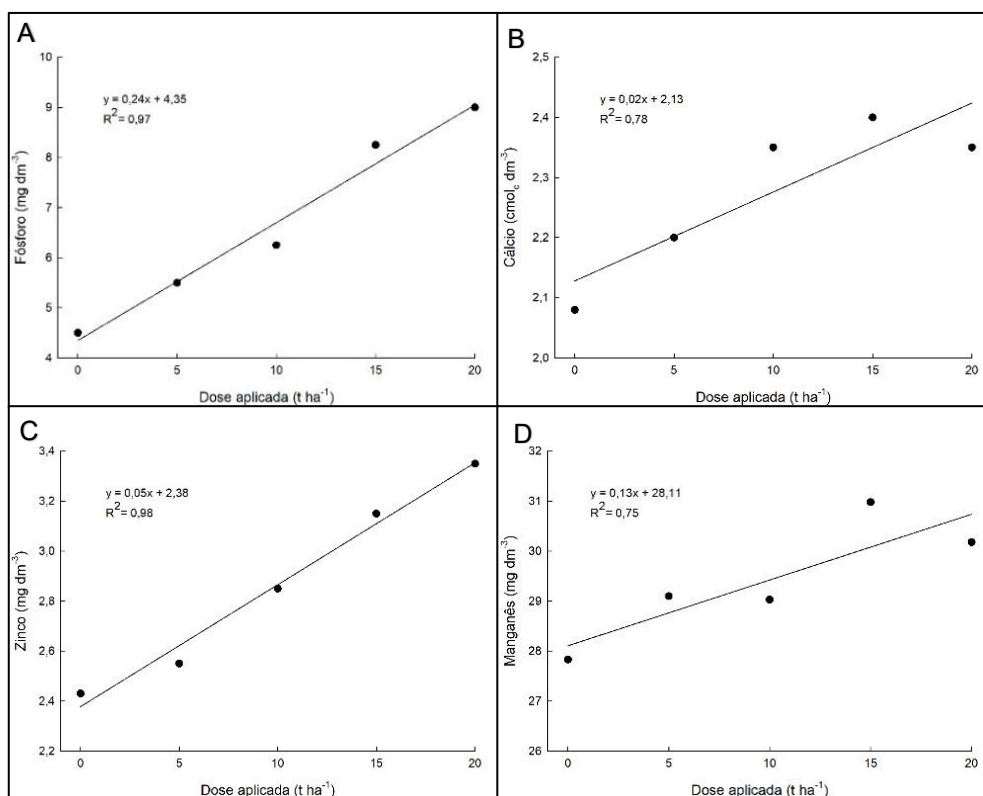


Figura 3. Teores de macro e micronutrientes no substrato fertilizado com composto de ETE, aos 220 dias - Fósforo (A), cálcio (B), zinco (C) e manganês (D).

Em relação ao tratamento controle, os teores de fósforo (P), cálcio (Ca) e zinco (Zn) foram superiores a partir da dose de 10 t ha^{-1} até a dose de 20 t ha^{-1} , enquanto o manganês (Mn) apresentou valores superiores apenas na dose de 15 t ha^{-1} .

O ferro (Fe) apresentou teores superiores ao controle em todas as doses avaliadas. Em contrapartida, o potássio (K) apresentou valores inferiores ao controle em todas as doses.

Os demais nutrientes não diferiram significativamente do tratamento controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 4).

Tabela 4. Fertilidade do substrato em função da aplicação de doses de composto de ETE, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	P	S	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	---mg dm ⁻³ ---		mmol _c dm ⁻³		--cmol _c dm ⁻³ --			-----mg dm ⁻³ -----		
Controle	7,25	7,50	6,52	2,10	0,93	0,13	0,80	369,75	27,70	2,30
0 t ha ⁻¹	4,50 ^{ns}	4,75 ^{ns}	0,62 ⁻	2,00 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,83 ^{ns}	424,50 ⁺	27,83 ^{ns}	2,43 ^{ns}
5 t ha ⁻¹	11,75 ^{ns}	5,00 ^{ns}	0,96 ⁻	2,45 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,11 ^{ns}	1,03 ^{ns}	436,00 ⁺	29,10 ^{ns}	2,55 ^{ns}
10 t ha ⁻¹	20,50 ⁺	6,75 ^{ns}	0,94 ⁻	2,70 ⁺	1,05 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,88 ^{ns}	427,50 ⁺	29,03 ^{ns}	2,85 ⁺
15 t ha ⁻¹	27,50 ⁺	5,25 ^{ns}	0,77 ⁻	2,85 ⁺	0,83 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,20 ^{ns}	461,50 ⁺	30,98 ⁺	3,15 ⁺
20 t ha ⁻¹	33,25 ⁺	5,50 ^{ns}	0,65 ⁻	2,98 ⁺	0,73 ^{ns}	0,16 ^{ns}	1,15 ^{ns}	438,75 ⁺	30,18 ^{ns}	3,35 ⁺
CV(%)	22,81	26,30	5,03	7,57	12,27	15,25	29,73	5,78	5,61	9,85

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade,

O aumento consistente dos teores de fósforo (P) e cálcio (Ca) é coerente com o fornecimento direto desses nutrientes pelo composto, associado à maior retenção promovida pelo incremento de matéria orgânica (MO). Mesmo sem alterações detectáveis de pH e CTC no curto prazo, a aplicação de bioossólidos compostados tende a elevar a MO e as bases trocáveis, além de disponibilizar P de forma gradual (Silva et al., 2024, Paganini et al., 2024).

Em relação ao zinco (Zn) e manganês (Mn), o incremento linear indica que a aplicação do composto contribuiu para o aumento da disponibilidade desses nutrientes no substrato, possivelmente em função da adição de MO, que pode complexar esses elementos em formas mais disponíveis. Como não houve alteração do pH, essa resposta pode ser atribuída principalmente ao efeito das doses aplicadas, especialmente para o Zn (Rengel, 2015, Paganini et al., 2024).

A ausência de tendência clara para os teores de ferro (Fe) em função das doses, aliada aos valores superiores ao controle em todos os tratamentos, indica enriquecimento do substrato a partir do composto, padrão também observado em sistemas com bioossólidos estabilizados (Marchuk et al., 2023, Silva et al., 2024).

Quanto ao potássio (K), os menores teores observados no substrato em relação ao controle podem ser explicados pelas condições de cultivo em vasos sob

irrigação frequente. Nessas condições, o K^+ , por ser um cátion monovalente, apresenta baixa retenção em substratos com reduzida capacidade de troca catiônica, favorecendo perdas por lixiviação (Mendes et al., 2016, Criscione et al., 2022).

Além disso, a maior presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} no sistema pode intensificar a competição catiônica nos sítios de troca, promovendo o deslocamento do K para a solução do solo e aumentando sua suscetibilidade à percolação (Rietra et al., 2017, Xie et al., 2021). Esses processos ajudam a explicar não apenas os menores teores de K no substrato, mas também os teores foliares mais baixos observados na folha “D” do abacaxizeiro.

Em relação ao enxofre (S), a ausência de variação significativa entre as doses do composto pode estar associada à mineralização gradual da MO, com liberação contínua do nutriente ao longo do tempo (Blum et al., 2013). Para o magnésio (Mg), o rápido equilíbrio entre a fase sólida, a solução do solo e a absorção pelas plantas contribui para a manutenção de seus teores no substrato, mesmo com o incremento das doses aplicadas (Gransee e Fühns, 2013).

Já o boro (B) apresenta dinâmica fortemente controlada pelo pH e pelo teor de MO, o que pode ter limitado variações mais expressivas no período experimental avaliado (Goldberg, 1997).

De forma geral, os resultados obtidos indicam que a aplicação do composto de ETE foi eficiente em manter os teores de P, Ca e Zn em níveis adequados à cultura (Silva et al., 2024). Por outro lado, o comportamento observado para o K, caracterizado por redução relativa, bem como as respostas diferenciadas dos micronutrientes em função das doses aplicadas, refletem-se diretamente nos teores observados na folha “D” do abacaxizeiro.

Apesar disso, mesmo com teores foliares mais baixos, não foram observados sintomas visuais de deficiência, e o crescimento vegetal foi mantido, indicando que os níveis nutricionais foram suficientes para sustentar o desenvolvimento das plantas nas condições avaliadas (Rengel, 2015, Rietra et al., 2017).

População de microrganismos

A população microbiana do substrato não foi afetada significativamente pelas doses do composto de ETE, apresentando médias gerais de $\log 4,39 \text{ UFC g}^{-1}$ para bactérias e $\log 3,91 \text{ UFC g}^{-1}$ para fungos.

Na comparação com o tratamento controle, pelo teste de Dunnett, os valores de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias foram superiores em todas as doses avaliadas. Para fungos, apenas a dose de 15 t ha⁻¹ apresentou valor superior ao controle (Tabela 5).

Tabela 5. Unidades formadoras de colônias (UFC) no substrato em função da aplicação de doses de composto de lodo de ETE, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	Bactérias	Fungos
	-----Log UFC g ⁻¹ -----	
Controle	3,94	3,83
0 t ha ⁻¹	4,41 ⁺	3,83 ^{ns}
5 t ha ⁻¹	4,37 ⁺	3,94 ^{ns}
10 t ha ⁻¹	4,35 ⁺	3,87 ^{ns}
15 t ha ⁻¹	4,63 ⁺	4,02 ⁺
20 t ha ⁻¹	4,48 ⁺	3,91 ^{ns}
CV(%)	4,08	1,78

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

Esse comportamento pode ser explicado pelo curto período de avaliação (220 dias) e pelo fato de o composto utilizado já se encontrar estabilizado, o que tende a reduzir respostas microbianas mais expressivas ao longo do tempo, sobretudo em condições de cultivo em vaso (Marchuk et al., 2023, Paganini et al., 2024).

Apesar da ausência de efeito significativo entre as doses, a comparação com o tratamento controle pelo teste de Dunnett evidenciou aumento consistente da população bacteriana em todas as doses do composto de ETE. Esse resultado indica que a adição do composto promoveu ambiente mais favorável à atividade bacteriana em comparação à adubação mineral, possivelmente em função do maior aporte de matéria orgânica (MO) e da disponibilização de fontes adicionais de carbono facilmente assimiláveis (Araújo et al., 2017, Silva et al., 2024).

Em relação à população fúngica, observou-se resposta mais restrita, com aumento significativo apenas na dose de 15 t ha⁻¹. Esse padrão sugere maior seletividade dos fungos às condições do substrato, respondendo positivamente apenas em uma faixa intermediária de aporte orgânico. De modo geral, a comunidade fúngica tende a responder mais lentamente à adição de resíduos orgânicos, especialmente quando estes apresentam maior grau de estabilização, o que pode

explicar a menor sensibilidade observada ao longo das doses avaliadas (Marchuk et al., 2023).

A ausência de ajuste a modelos de regressão para ambas as populações microbianas também pode estar relacionada às limitações metodológicas da técnica de contagem de unidades formadoras de colônias (UFC), que quantifica apenas a fração cultivável da microbiota do solo. Dessa forma, alterações na diversidade e na atividade metabólica dos microrganismos podem não ter sido plenamente captadas, mesmo diante do incremento de MO no substrato (Araújo et al., 2017, Paganini et al., 2024).

De modo geral, os resultados indicam que a aplicação do composto de ETE contribuiu para manter ou aumentar a população microbiana do substrato em relação ao manejo convencional, sem provocar desequilíbrios entre bactérias e fungos. Esse comportamento reforça o potencial do composto como insumo orgânico seguro do ponto de vista microbiológico, promovendo melhoria gradual das condições biológicas do substrato, ainda que respostas mais expressivas possam demandar maior tempo de avaliação ou condições de cultivo em solo a campo (Marchuk et al., 2023, Silva et al., 2024).

Teores nutricionais na folha “D”

Quanto aos teores nutricionais na folha “D” do abacaxizeiro, não houve diferença significativa entre os tratamentos para os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu) e boro (B), os quais apresentaram valores médios de 8,85; 2,60; 12,10; 5,74; 4,53 e 1,81 g kg⁻¹ para macronutrientes e 4,95 e 26,35 mg kg⁻¹ para micronutrientes, respectivamente.

Houve diferença significativa entre os tratamentos com aplicação do composto de ETE apenas para os micronutrientes: ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn), que se ajustaram aos modelos quadráticos de regressão, apresentando teores máximos de 114,37; 9,85 e 187,18 mg kg⁻¹, estimados nas doses de 6,17; 17,50 e 13,56 t ha⁻¹, respectivamente (Figuras 4A, 4B e 4C).

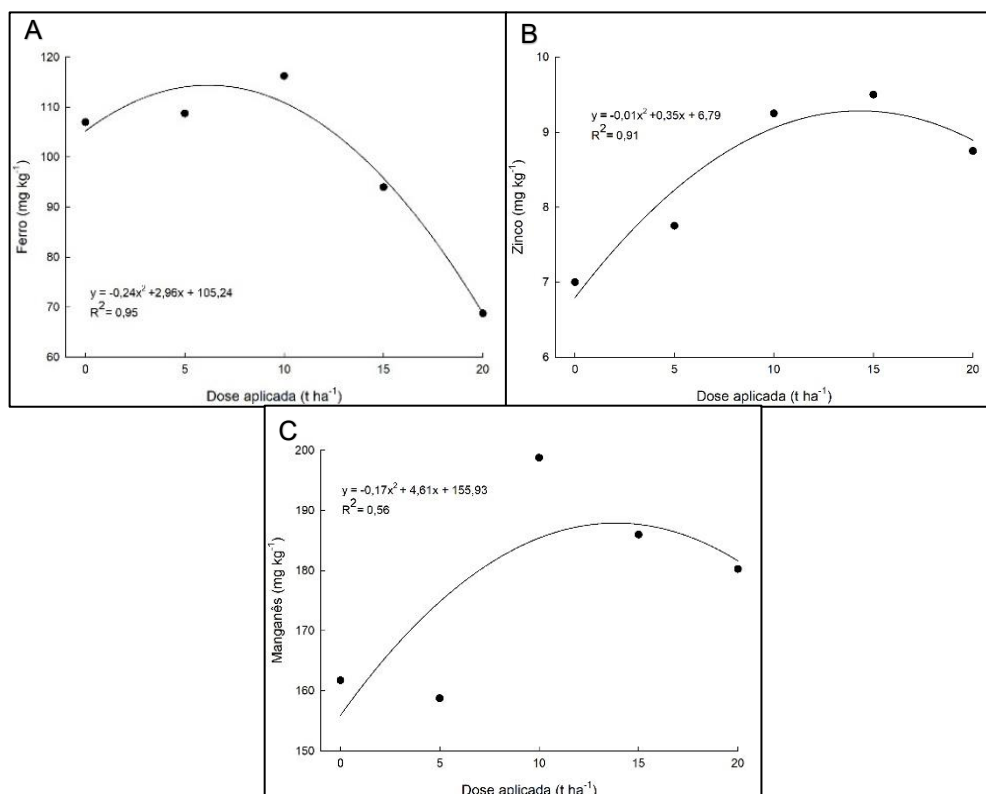


Figura 4. Teores nutricionais na folha “D” de plantas de abacaxi fertilizadas com composto de ETE, aos 220 dias - Ferro (A), Zinco (B) e Manganês (C).

Na comparação das doses com o tratamento com fertilização convencional, pelo teste de Dunnett, observou-se que, dentre os macronutrientes, os teores de nitrogênio (N) e potássio (K) foram inferiores ao controle em todas as doses. Por outro lado, os teores de fósforo (P) na dose de 15 t ha⁻¹ e os de magnésio (Mg) a partir da dose de 10 t ha⁻¹ foram superiores ao controle.

Quanto aos micronutrientes, os teores de ferro (Fe), com exceção da maior dose, foram superiores ao controle. O manganês (Mn) apresentou valores superiores apenas na dose de 10 t ha⁻¹, enquanto o zinco (Zn) foi superior ao controle a partir da dose de 10 t ha⁻¹ até a maior dose avaliada (Tabela 6).

Tabela 6. Teores nutricionais na folha “D” do abacaxizeiro ‘BRS Imperial’ em função da aplicação de doses de composto de lodo de ETE, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----					
Controle	11,73	2,23	14,63	5,30	3,67	1,63	26,00	76,75	164,50	7,25	5,00
0 t ha ⁻¹	8,65 ⁻	2,38 ^{ns}	12,35 ⁻	5,64 ^{ns}	4,45 ^{ns}	1,76 ^{ns}	25,50 ^{ns}	107,00 ⁺	161,75 ^{ns}	7,00 ^{ns}	5,75 ^{ns}
5 t ha ⁻¹	9,13 ⁻	2,55 ^{ns}	12,49 ⁻	5,57 ^{ns}	4,14 ^{ns}	1,80 ^{ns}	26,75 ^{ns}	108,75 ⁺	158,75 ^{ns}	7,75 ^{ns}	5,00 ^{ns}
10 t ha ⁻¹	8,65 ⁻	2,60 ^{ns}	12,35 ⁻	5,81 ^{ns}	4,72 ⁺	1,86 ^{ns}	29,00 ^{ns}	116,25 ⁺	198,75 ⁺	9,25 ⁺	4,75 ^{ns}
15 t ha ⁻¹	9,28 ⁻	2,85 ⁺	12,03 ⁻	6,07 ^{ns}	4,77 ⁺	1,82 ^{ns}	24,75 ^{ns}	94,00 ⁺	186,00 ^{ns}	9,50 ⁺	4,50 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	8,55 ⁻	2,63 ^{ns}	11,27 ⁻	5,60 ^{ns}	4,55 ⁺	1,80 ^{ns}	25,75 ^{ns}	68,75 ^{ns}	180,25 ^{ns}	8,75 ⁺	4,75 ^{ns}
CV(%)	8,99	12,31	8,00	11,47	8,19	6,74	9,51	8,79	9,43	9,12	16,29

+ Significativo e superior à testemunha Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

A ausência de diferenças significativas nos teores foliares da maioria dos macronutrientes e dos micronutrientes cobre (Cu) e boro (B) pode estar associada ao incremento de biomassa observado nas plantas, evidenciado também na folha “D”. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito de diluição, no qual o aumento do crescimento vegetal resulta na redução relativa dos teores nutricionais, mesmo quando a absorção de nutrientes ocorre em níveis adequados. Situação inversa pode ser observada em plantas com menor crescimento, nas quais ocorre concentração dos nutrientes nos tecidos, conforme relatado por Marques et al. (2013) para a folha “D” do abacaxizeiro.

De modo geral, os teores foliares na folha “D” situaram-se, em sua maioria, dentro ou acima das faixas de suficiência reportadas para a cultura. Especificamente, os teores de fósforo (P) (2,23–2,85 g kg⁻¹), cálcio (Ca) (5,30–6,07 g kg⁻¹), magnésio (Mg) (3,67–4,77 g kg⁻¹) e enxofre (S) (1,63–1,86 g kg⁻¹) atenderam aos valores de referência (P ≥ 1; Ca ≥ 4; Mg ≥ 2,8; S entre 1,45 e 1,80 g kg⁻¹).

Por outro lado, os teores de nitrogênio (N) (8,55–11,73 g kg⁻¹) e, principalmente, de potássio (K) (11,27–14,63 g kg⁻¹) permaneceram abaixo dos valores de referência frequentemente citados na literatura (N ≥ 12; K ≥ 21 g kg⁻¹) (Spironello et al., 2004, Teixeira et al., 2009, Ramos et al., 2011). Ressalta-se, no entanto, que os valores críticos podem variar em função do protocolo de amostragem e do estágio fenológico da planta (Siebeneichler et al., 2002).

Uma das possíveis explicações para os baixos teores de K, mesmo no tratamento controle, além do efeito de diluição, é o antagonismo iônico com Ca e Mg. Esses nutrientes apresentaram teores acima dos valores considerados ideais, o que

pode ter intensificado a competição por sítios de absorção, reduzindo a captação de K, dependendo da relação K:Ca:Mg e do pH do sistema (Rietra et al., 2017, Xie et al., 2021, Qu et al., 2023).

Adicionalmente, como destacado por Mendes et al. (2016) e Criscione et al. (2022), o cultivo em vasos sob irrigação frequente favorece a lixiviação de K. Por se tratar de um cátion monovalente, o K^+ apresenta baixa retenção nos coloides do solo, especialmente em condições de baixa CTC, o que aumenta sua perda por percolação e reduz sua atividade na solução do solo. Esse processo pode ter contribuído para os menores teores foliares observados, mesmo sob condições de fornecimento nutricional adequado.

Crescimento vegetal

A fertilização com composto de ETE influenciou significativamente o crescimento das plantas, com exceção do número de folhas (NF), diâmetro do coleto (DC), massa seca da raiz (MSR) e largura da folha “D” (LFD), que não se ajustaram a modelos de regressão, apresentando médias gerais de 30 unidades, 27,39 mm, 18,97 g e 4,08 cm, respectivamente.

As variáveis comprimento da parte aérea (CPA), massa seca da parte aérea (MSPA), comprimento da folha “D” (CFD), área foliar da folha “D” (AFFD) e massa seca da folha “D” (MSFD) ajustaram-se a modelos de regressão linear crescente, com aumento proporcional às doses aplicadas. Foram observados incrementos máximos, entre as doses de 0 e 20 t ha⁻¹, de 6,90%, 17,36%, 6,14%, 19,20% e 12,45%, respectivamente (Figuras 5A, 5B, 5C, 5D e 5E).

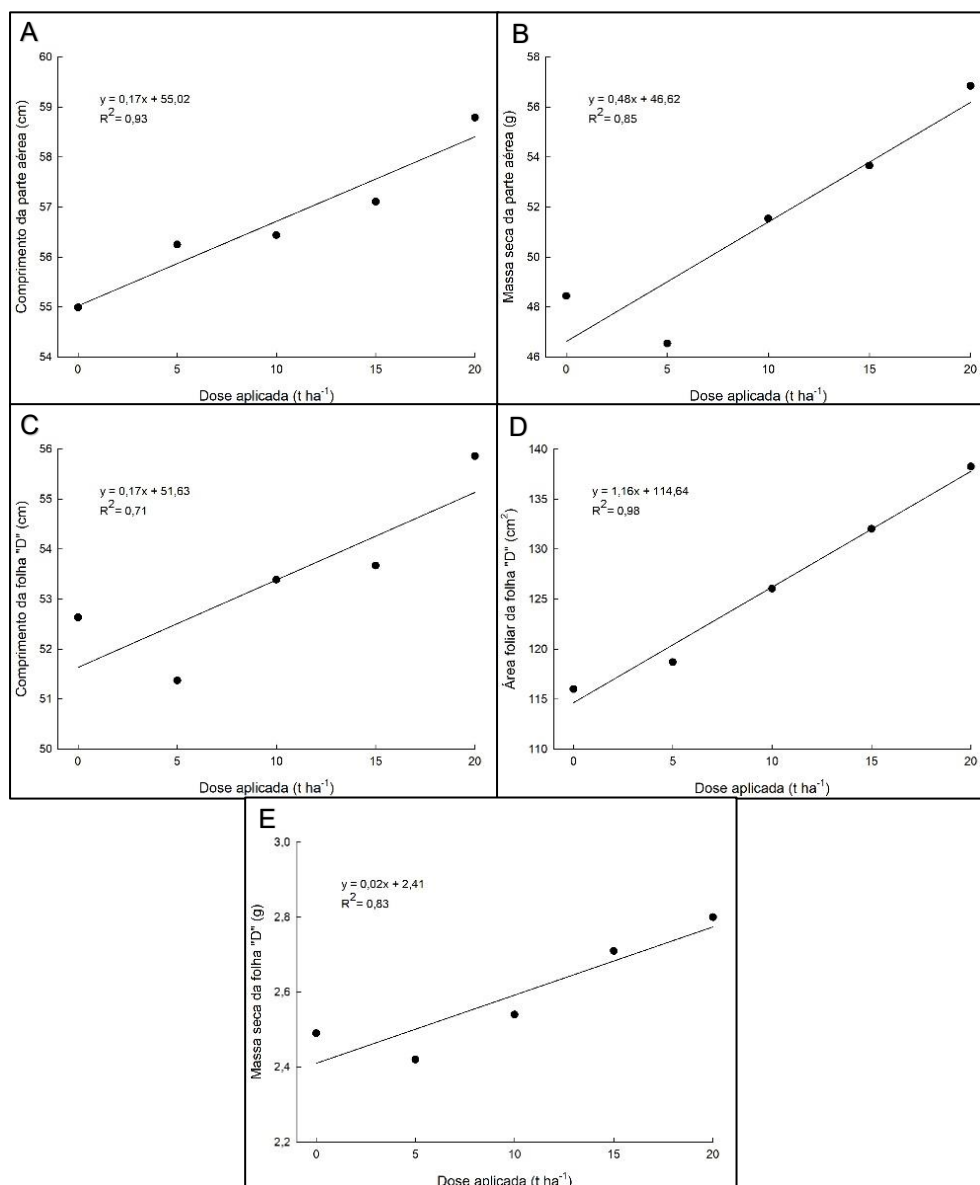


Figura 5. Variáveis de crescimento de plantas de abacaxi fertilizadas com composto de ETE, aos 220 dias - comprimento da parte aérea (CPA) (A), massa seca da parte aérea (MSPA) (B), comprimento da folha "D" (CFD) (C), área foliar da folha "D" (AFFD) (D) e massa seca da folha "D" (MSFD) (E).

Na comparação das doses com o tratamento com fertilização convencional, pelo teste de Dunnett, observou-se que a maioria das variáveis não diferiu significativamente do controle.

Como exceção, a matéria seca da raiz (MSR) apresentou valor superior ao controle na dose de 10 t ha⁻¹, enquanto o número de folhas (NF) foi inferior ao controle em todas as doses avaliadas (Tabela 7).

Tabela 7. Crescimento do abacaxizeiro Imperial em função da aplicação de doses de composto de lodo de ETE, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	MSPA	MSR	MSFD	NF	DC	CPA	LFD	CFD	AFFD
	-----g-----			-	mm	-----cm-----			cm ²
Controle	54,07	17,48	2,75	32,06	26,63	57,05	4,39	53,56	129,96
0 t ha ⁻¹	48,44 ^{ns}	17,95 ^{ns}	2,49 ^{ns}	29,90 ⁻	26,88 ^{ns}	54,99 ^{ns}	3,98 ^{ns}	52,63 ^{ns}	116,00 ^{ns}
5 t ha ⁻¹	46,54 ^{ns}	16,61 ^{ns}	2,42 ^{ns}	29,23 ⁻	27,78 ^{ns}	56,25 ^{ns}	4,01 ^{ns}	51,37 ^{ns}	118,69 ^{ns}
10 t ha ⁻¹	51,54 ^{ns}	23,60 ⁺	2,54 ^{ns}	30,36 ⁻	28,06 ^{ns}	56,44 ^{ns}	3,94 ^{ns}	53,39 ^{ns}	126,05 ^{ns}
15 t ha ⁻¹	53,66 ^{ns}	17,75 ^{ns}	2,71 ^{ns}	30,06 ⁻	27,75 ^{ns}	57,11 ^{ns}	4,27 ^{ns}	53,67 ^{ns}	132,03 ^{ns}
20 t ha ⁻¹	56,85 ^{ns}	18,96 ^{ns}	2,80 ^{ns}	29,25 ⁻	26,50 ^{ns}	58,79 ^{ns}	4,17 ^{ns}	55,86 ^{ns}	138,27 ^{ns}
CV(%)	12,61	11,96	9,87	2,57	5,29	3,00	5,88	3,34	6,82

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

Os incrementos lineares observados no comprimento e na massa seca da parte aérea (CPA e MSPA), bem como no comprimento (CFD), na área foliar (AFFD) e na massa seca da folha “D” (MSFD), indicam que a aplicação do composto de ETE promoveu melhorias na nutrição das plantas e nas condições do substrato, resultando em maior produção de biomassa.

Esse comportamento pode ser atribuído ao maior aporte de matéria orgânica (MO) e nutrientes presentes no resíduo, que contribuem para a melhoria da fertilidade do substrato e para a liberação gradual de alguns elementos essenciais às plantas. Dessa forma, o composto de ETE atua não apenas como fonte direta de nutrientes, mas também como condicionador do substrato, tornando-o mais favorável ao desenvolvimento vegetativo (Silva et al., 2024, Comineti et al., 2025).

Algumas variáveis, como número de folhas (NF), diâmetro do coleto (DC), massa seca da raiz (MSR) e largura da folha “D” (LFD), não responderam às doses do composto. Esse comportamento pode estar relacionado a fatores genéticos e fisiológicos inerentes à espécie, mais do que ao manejo nutricional.

O número de folhas, por exemplo, tende a apresentar relativa estabilidade na cultura do abacaxizeiro, independentemente do manejo nutricional, uma vez que a planta prioriza o crescimento e a expansão foliar em detrimento da emissão de novas folhas. Estudos envolvendo fatores como nutrição, cultivar e densidade de plantio indicam que essa variável é pouco responsiva a tais condições (Omotoso e Akinrinde, 2013, Neri et al., 2021).

Por outro lado, a massa radicular pode ter sido limitada pelo volume dos vasos, condição que frequentemente restringe o crescimento do sistema radicular em experimentos conduzidos em ambiente protegido (Poorter et al., 2012).

Dessa forma, a ausência de resposta para essas variáveis não indica necessariamente a ineficiência do insumo, mas sim menor sensibilidade de determinados parâmetros de crescimento às condições experimentais adotadas.

CONCLUSÕES

A aplicação do composto de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) promoveu melhoria parcial na fertilidade do substrato, com aumento da matéria orgânica (MO) e maior disponibilidade de fósforo (P), cálcio (Ca) e micronutrientes, sem ocasionar alterações químicas negativas.

De modo geral, doses entre 5 e 10 t ha⁻¹ proporcionaram as respostas mais equilibradas para os atributos químicos do substrato.

O composto favoreceu o crescimento do abacaxizeiro 'BRS Imperial' e manteve o estado nutricional adequado das plantas, com respostas positivas para os micronutrientes ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn). Em contrapartida, o potássio (K) apresentou teores mais baixos, sem prejuízo ao desenvolvimento vegetal.

A população bacteriana foi superior ao manejo com adubação mineral, indicando efeito positivo do composto sobre as condições biológicas do substrato.

De forma geral, o composto de lodo de ETE apresenta potencial para uso na adubação do abacaxizeiro, contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo fomento à pesquisa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Khaliq, S. J., Al-Busaidi, A., Ahmed, M., Al-Wardy, M., Agrama, H., Choudri, B. S. (2017) The effect of municipal sewage sludge on the quality of soil and crops. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6:289-299. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0176-4>
- Abraham, R.A., Joshi, J., Abdullah, S. (2023) A comprehensive review of pineapple processing and its by-product valorization in India. *Food Chemistry Advances*, 3:100416-1.
- Araújo, F.S., Leite, L.F.C., Souza, Z.M. de, Torres, J.L.R., Costa, A.S.H.B., Ferreira, A.H.C. (2017) Fertility and total organic carbon in Oxisol under different management systems in savannah of Piauí, Brazil. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20:165-172.
- Blum, S.C., Lehmann, J., Solomon, D., Caires, E.F., Alleoni, L.R.F. (2013) Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. *Geoderma*, 200:156-164.
- Bunts, J.S., Rovira, A.D. (1995) Microbiological studies of some subantarctic soils. *Journal of Soil Science*, 6:119-128.
- Comineti, C., Schlindwein, M., Hoeckel, P. (2025) Uso de lodo de esgoto na agricultura e impactos na saúde pública no Brasil. *International Journal of Agrarian Sciences – PDVAGRO*, 5:79-91.
- Criscione, K.S., Fields, J.S., Owen Jr., J.S., Fultz, L., Bush, E. (2022) Evaluating stratified substrates effect on containerized crop growth under varied irrigation strategies. *HortScience*, 57:400-413.
- Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Carvalho, A.J.C., Caetano, L.C.S., Vieira, M.E., Peçanha, D.A. (2021) Potassium fertilization in pineapple fruit quality. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 43:e018-1. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021018>.
- Duong, T.T., Verma, S.L., Penfold, C., Marschner, P. (2013) Nutrient release from composts into the surrounding soil. *Geoderma*, 195:42-47.

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024) Crops and livestock products: pineapple production in 2023. Rome. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 22 de dez. de 2025.

Goldberg, S. (1997) Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48.

Gransee, A., Führs, H. (2013) Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368:5-21.

Gunawardena, M.A., Lokupitiya, E. (2024) Comparison of conventionally and organically grown pineapple in Sri Lanka: an integrative approach applying life cycle assessment and externalities. *Cleaner Environmental Systems*, 14:100219-1.

Jackson, M.L. (1958) Soil chemical analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 498p.

Liao, F., Zheng, Y., Wang, X. (2025) Promoting the replacement of chemical fertilizer with organic fertilizer: the role of policy incentives and digital technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9:1527913-1. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527913>

Loures, D.S., Yamashita, O.M., Carvalho, M.A.C., Koga, P.S., Campos, O.R., Massaroto, J.A., Arantes, K.R., Felito, R.A., Gervazio, W., Rocha, A.M., Cândido, A.C.F.T. (2021) Cultivo do abacaxizeiro em função do parcelamento da adubação potássica de cobertura. *Research, Society and Development*, 10:e42510716722-1. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16722>

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, SP: POTAFOS, 319p.

Marchuk, S., Tait, S., Sinha, P., Harris, P., Antille, D.L., McCabe, B.K. (2023) Biosolids-derived fertilisers: a review of challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 875:162555-1.

Maroušek, J., Hašková, S., Zeman, R., Žák, J., Vaníčková, R., Maroušková, A., Váchal, J., Myšková, K. (2016) Polemics on ethical aspects in the compost business. *Science and Engineering Ethics*, 22:581-590. <https://doi.org/10.1007/s11948-015-9664-y>

Marques, L.S., Andreotti, M., Buzetti, S., Teixeira Filho, M.C.M., Garcia, C.M.P. (2013) Análise química da folha “D” de abacaxizeiro cv. Smooth Cayenne antes e após a indução floral em função de doses e parcelamentos de nitrogênio. Bioscience Journal, 29:41-50. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13390>. Acesso em: 22 de dez. de 2025.

Martin, J.P. (1950) Use of acid, rose bengal, and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. Soil Science, 69:215-232.

Mendes, W.D.C., Alves, J., Cunha, P.C.D., Silva, A.R.D., Evangelista, A.W., Casaroli, D. (2016) Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20:972-977.

Miyazawa, M., Pavan, M.A., Muraoka, T., Carmo, C.A.F.S., Melo, W.J. (2009) Análise química de tecido vegetal. In: Silva, F.C. da (ed.) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.191-233.

Mohd Ali, M., Hashim, N., Abd Aziz, S., Lasekan, O. (2022) Shelf life prediction and kinetics of quality changes in pineapple (*Ananas comosus*) varieties at different storage temperatures. Horticulturae, 8:e10992-1. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8110992>.

Neri, J.C., Meléndez Mori, J.B., Vilca Valqui, N.C., Huaman Huaman, E., Collazos Silva, R., Oliva, M. (2021) Effect of planting density on the agronomic performance and fruit quality of three pineapple cultivars (*Ananas comosus* (L.) Merr.). International Journal of Agronomy, 2021:5559564-1.

Nkolisa, Z., Mpambani, B., Mtamzeli-Cekiso, N., Ncama, K. (2025) Economic viability of organic fertilizers to improve growth, yield, and quality of pineapples in Africa: a review. Horticulturae, 11:636-1.

Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. (eds.) (2007) Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p.

Omotoso, S.O., Akinrinde, E.A. (2013) Effect of nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality parameters in pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) at Ado-Ekiti, Nigeria. International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science, 3:11-16.

Paganini, E.A.L., Silva, R.B., Ribeiro Roder, L., Guerrini, I.A., Capra, G.F., Grilli, E., Ganga, A. (2024) A systematic review and meta-analysis of the sustainable impact of sewage sludge application on soil organic matter and nutrient content. Sustainability, 16:9865-1. <https://doi.org/10.3390/su16229865>.

Peters, J.B. (2005) Wisconsin procedures for soil testing, plant analysis and feed and forage analysis: plant analysis. Madison: University of Wisconsin Extension. 304p. Disponível em: <https://datcp.wi.gov/Documents/NMProcedures.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

Poorter, H., Bühler, J., van Dusschoten, D., Climent, J., Postma, J.A. (2012) Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. Functional Plant Biology, 39:839-850.

Qu, S., Li, H., Zhang, X., Gao, J., Ma, R., Ma, L., Ma, J. (2023) Effects of magnesium imbalance on root growth and nutrient absorption in different genotypes of vegetable crops. Plants, 12:3518-1.

Ramos, M.J.M., Monnerat, P.H., Pinho, L.G.R., Silva, J.A. da (2011) Deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro 'Imperial': composição mineral. Revista Brasileira de Fruticultura, 33:261-271. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000032>

Rengel, Z. (2015) Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 15:397-409.

Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S. (2017) Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. Journal of Plant Nutrition, 40:928-946. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>.

Rodrigues, J.D. (2023) Compostagem de lodo e sua utilização na substituição parcial de fertilizantes minerais no cultivo do milho. Mestrado em Biotecnologia Vegetal –

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 82p.

Siebeneichler, S.C., Monnerat, P.H., Carvalho, A.J.C., Silva, J.A. (2002) Composição mineral da folha em abacaxizeiro: efeito da parte da folha analisada. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 24:194-198.

Silva, R.D.S., Teixeira Filho, M.C.M., Jalal, A., Alves, R.S., Elias, N.C., Nascimento, R.E.N., Nogueira, T.A.R. (2024) Treating tropical soils with composted sewage sludge reduces the mineral fertilizer requirements in sugarcane production. *Land*, 13:1820-1.

Souza, L.F. da S., Oliveira, A.M.G. (2021) Calagem e adubação para o abacaxizeiro. In: Borges, A.L. (ed.) *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.95-122.

Souza, L.F. da S., Reinhardt, D.H. (2007) Pineapple. In: Crisóstomo, L.A., Naumov, A., Johnston, A.E. (eds.) *Fertilizing for high yield and quality tropical fruits of Brazil*. Horgen: International Potash Institute, p.179-201.

Spironello, A., Quaggio, J.A., Teixeira, L.A.J., Furlani, P.R., Sigrist, M.M. (2004) Pineapple yield and fruit quality affected by NPK fertilization in a tropical soil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 26:155-159. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452004000100041>

Teixeira, L.A.J., Quaggio, J.A., Zambrosi, F.C.B. (2009) Preliminary DRIS norms for ‘Smooth Cayenne’ pineapple and derivation of critical levels of leaf nutrient concentrations. *Acta Horticulturae*, 822:131-138.

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (2017) *Manual de métodos de análise de solo*. 3.ed. Brasília: Embrapa, 573p.

Tontti, T., Poutiainen, H., Heinonen-Tanski, H. (2017) Efficiently treated sewage sludge supplemented with nitrogen and potassium is a good fertilizer for cereals. *Land Degradation and Development*, 28:742-751. <https://doi.org/10.1002/ldr.2528>

Weifeng, Z., Weixiu, Y., Zhiling, M., Xiaoyan, Z., Ligu, C., Shenghui, L., Yanfang, Z. (2020) Effects of time and height of shading on yield and quality of pineapple. *IOP*

Conference Series: Earth and Environmental Science, 512:012101-1.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/512/1/012101>

Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., Petersen, J. (2021) Synergistic and antagonistic interactions between magnesium and potassium in plants. *The Crop Journal*, 9:249-256.

Yüksel, O., Kavdır, Y. (2020) Improvement of soil quality parameters by municipal solid waste compost application in clay-loam soil. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8:603-609.

3.3. RESÍDUO DE ÁCIDO LÁTICO NA FERTILIDADE E MICROBIOTA DO SUBSTRATO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO ABACAXIZEIRO 'IMPERIAL'

RESUMO

O uso de resíduos agroindustriais como insumos agrícolas tem sido amplamente estudado como alternativa para reduzir a dependência de fertilizantes minerais. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de diferentes doses do resíduo da produção de ácido lático sobre a fertilidade e a microbiota do substrato, bem como sobre o crescimento e a nutrição do abacaxizeiro 'BRS Imperial'. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, com cinco doses do resíduo da produção de ácido lático (0, 4, 8, 12 e 16 t ha⁻¹) e um tratamento adicional com adubação mineral convencional. Aos 220 dias após o plantio, foram avaliados atributos químicos e microbiológicos do substrato, crescimento vegetal e teores nutricionais na folha "D". A aplicação do resíduo da produção de ácido lático promoveu aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) em doses intermediárias e incremento linear dos teores de cálcio (Ca) e enxofre (S) no substrato, enquanto os teores de potássio (K) e magnésio (Mg) apresentaram redução. A população microbiana não foi influenciada pelas doses aplicadas. No crescimento vegetal, apenas o comprimento da parte aérea apresentou resposta positiva à aplicação do resíduo da produção de ácido lático. Na nutrição foliar, observou-se aumento dos teores de Ca e redução dos teores de nitrogênio (N) e Mg, enquanto os demais nutrientes não apresentaram variação significativa. Os resultados indicam que o resíduo da produção de ácido lático atua principalmente como fonte de Ca e S, sendo mais eficiente quando aplicado em doses intermediárias, entre 8 e 12 t ha⁻¹, devendo ser utilizado como insumo complementar no manejo da fertilidade do substrato e da nutrição do abacaxizeiro.

Palavras-chave: *Ananas comosus* (L.) Merr.; resíduo agroindustrial; nutrição vegetal; fertilidade do solo; crescimento vegetal.

LACTIC ACID RESIDUE ON SUBSTRATE FERTILITY AND MICROBIOTA, GROWTH, AND NUTRITION OF 'IMPERIAL' PINEAPPLE

ABSTRACT

The use of agro-industrial residues as agricultural inputs has been investigated as an alternative to reduce the dependence on mineral fertilizers. In this context, this study aimed to evaluate the effects of different doses of lactic acid industry by-product on substrate fertility and microbiota, as well as on the growth and nutritional status of 'BRS Imperial' pineapple plants. The experiment was carried out under greenhouse conditions in a randomized block design, with five lactic acid industry by-product doses (0, 4, 8, 12 and 16 t ha⁻¹) and an additional treatment with conventional mineral fertilization. At 220 days after planting, chemical and microbiological attributes of the substrate, plant growth and nutrient contents in the "D" leaf were evaluated. Lactic acid industry by-product application increased cation exchange capacity at intermediate doses and promoted linear increases in calcium and sulfur contents in the substrate, while potassium and magnesium decreased. Microbial populations were not affected by the applied doses. Regarding plant growth, only shoot length showed a positive response to lactic acid industry by-product. Leaf nutritional analysis indicated increased calcium contents and reduced nitrogen and magnesium levels, whereas the other nutrients showed no significant variation. The results indicate that lactic acid industry by-product acts mainly as a source of calcium and sulfur, being more effective when applied at intermediate rates of 8 and 12 t ha⁻¹ and should therefore be used as a complementary input in the management of pineapple fertility and plant nutrition.

Keywords: *Ananas comosus* (L.) Merr.; agro-industrial residue; plant nutrition; soil fertility; plant growth.

INTRODUÇÃO

O abacaxizeiro [*Ananas comosus* (L.) Merr.] é uma planta cultivada principalmente em regiões tropicais e subtropicais do mundo, destacando-se entre as frutas mais consumidas globalmente, tanto na forma *in natura* quanto processada, devido às suas qualidades sensoriais, como aroma, sabor e cor, que o tornam atrativo para os mercados interno e externo (Weifeng et al., 2020). Entre as frutas tropicais, o abacaxi ocupa posição de destaque como a terceira fruta com maior demanda mundial, atrás apenas da banana e dos citros, com participação comercial crescente ao longo dos anos (Mohd Ali et al., 2022, Abraham et al., 2023).

No ano de 2023, a produção mundial de abacaxi superou 29 milhões de toneladas, sendo Indonésia, Filipinas, Costa Rica, Brasil e China os principais países produtores, com aproximadamente 3,16, 2,94, 2,94, 2,39 e 2,1 milhões de toneladas, respectivamente (FAOSTAT, 2024).

O cultivo do abacaxizeiro apresenta elevada exigência nutricional, a qual pode variar em função das condições edafoclimáticas, da cultivar, da densidade de plantio e da destinação da produção, seja para consumo *in natura* ou processamento industrial (Loures et al., 2021). Dentre os nutrientes, o nitrogênio (N) e o potássio (K) destacam-se como os mais críticos, sendo o N diretamente relacionado ao tamanho e peso dos frutos, enquanto o K exerce papel fundamental na qualidade físico-química dos frutos (Omotoso e Akinrinde, 2013, Cunha et al., 2021).

Historicamente, essa elevada demanda nutricional tem sido suprida por fertilizantes minerais convencionais. Embora esses insumos desempenhem papel essencial na produtividade agrícola, seu uso inadequado pode resultar em impactos ambientais, como lixiviação de nutrientes, eutrofização de corpos hídricos, acidificação do solo e aumento da emissão de gases de efeito estufa (Basheer et al., 2024, Gunawardena et al., 2024).

Diante desse cenário, há crescente interesse na adoção de alternativas mais sustentáveis, como fertilizantes orgânicos e compostos, que apresentem viabilidade econômica e menor impacto ambiental (Liao et al., 2025, Nkolisa et al., 2025). Nesse contexto, destaca-se a reutilização de resíduos agroindustriais, que, além de mitigar problemas associados à sua disposição inadequada, podem agregar valor agrônomo ao sistema produtivo. Estudos recentes demonstram que resíduos oriundos de cadeias agroindustriais, quando incorporados ao solo ou submetidos à

compostagem, contribuem para o aumento da matéria orgânica, para a melhoria da retenção de nutrientes e para o desempenho das culturas (Silva et al., 2025).

Dentre esses materiais, o resíduo oriundo da produção de ácido láctico, quimicamente caracterizado como sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e denominado em alguns estudos como “Ferkal”, apresenta potencial agrônomo promissor. Suas características químicas indicam capacidade de fornecimento de cálcio (Ca) e enxofre (S), nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, conforme observado por Pralon e Martins (2001) em *Mimosa caesalpiniaefolia*.

O abacaxizeiro, por sua vez, apresenta elevada exigência nutricional e responde de forma significativa ao fornecimento equilibrado de Ca e S, elementos associados ao crescimento radicular, à qualidade dos frutos e à manutenção da fertilidade do solo. Dessa forma, investigar o uso desse subproduto nessa cultura é relevante, pois, além de contribuir para a reciclagem de resíduos agroindustriais, pode representar alternativa viável para reduzir a dependência de insumos minerais convencionais e promover sistemas de produção mais sustentáveis.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes doses do resíduo da produção de ácido láctico sobre a fertilidade e a microbiota do substrato, bem como sobre o crescimento e a nutrição do abacaxizeiro ‘BRS Imperial’.

Parte-se da hipótese de que a aplicação do resíduo da produção de ácido láctico atue principalmente na modificação dos atributos químicos do substrato, em função do fornecimento de Ca e S, contribuindo para o equilíbrio nutricional da cultura. Espera-se, ainda, que o abacaxizeiro apresente respostas mais expressivas em doses intermediárias, enquanto doses mais elevadas tendem a não promover incrementos adicionais no crescimento, atuando predominantemente como condicionador químico do substrato.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Unidade de Apoio à Pesquisa do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), no município de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro,

Brasil (21°45'S e 41°17'W, 11 m de altitude), em casa de vegetação, entre os meses de janeiro e agosto de 2024.

Nesse período, a temperatura máxima diária no interior da casa de vegetação variou entre 38 e 49°C, enquanto a temperatura mínima variou entre 15 e 22°C. Os dados foram obtidos com o equipamento HOBO® Data Logger Pro v2 (Onset Headquarters, Bourne, MA, EUA) (Figura 1).

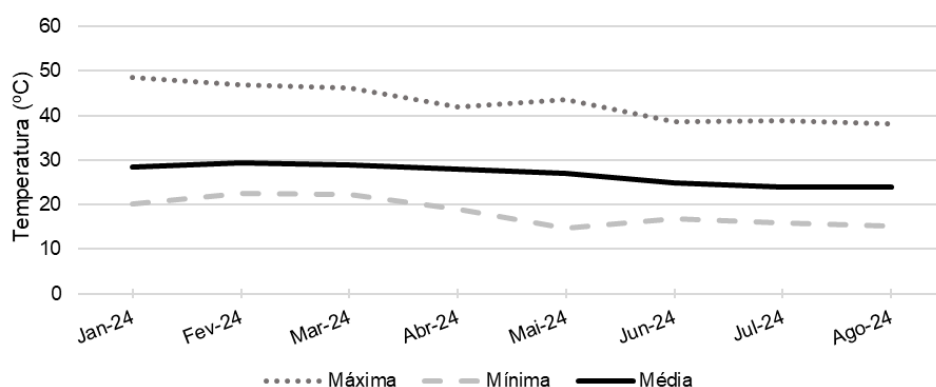


Figura 1. Temperatura máxima, mínima e média da casa de vegetação (Data Logger HOBO® pro v2) de janeiro a agosto de 2024, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Delineamento e condução do experimento

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), com 5+1 tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses do resíduo da produção de ácido láctico (0, 4, 8, 12 e 16 t ha⁻¹), aplicadas como única fonte de fertilização, sem qualquer complementação mineral, além de um tratamento adicional (controle), que recebeu adubação mineral conforme recomendado por Souza e Oliveira (2021).

Ao todo, foram constituídas 24 unidades experimentais, sendo cada unidade composta por dois vasos, contendo duas mudas de abacaxizeiro cada.

Foram utilizadas mudas do abacaxizeiro 'BRS Imperial', obtidas no município de São Francisco de Itabapoana (RJ), previamente classificadas quanto ao peso, altura, número de folhas e diâmetro do coleto. As mudas apresentaram, em média, 90 g de massa, 34 cm de altura, 23 folhas e 19 mm de diâmetro do coleto. Após a classificação, foram agrupadas de acordo com o peso e distribuídas de forma homogênea entre os blocos e tratamentos.

Para o plantio, foram utilizados vasos com volume de 18,5 dm³, preenchidos com 16 dm³ da mistura de um Argissolo Amarelo Distrófico, coletado em subsuperfície,

e areia, na proporção de 1:1 (v/v), além de 2 dm³ de brita nº 1 no fundo do vaso, com o objetivo de facilitar a drenagem.

O solo foi coletado na Escola Técnica Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes (21°45'S e 41°20'W, 10 m de altitude), a 12 km da UENF, enquanto a areia foi obtida em um areal comercial do mesmo município.

Foi realizada a caracterização química e granulométrica do substrato, de acordo com Teixeira et al. (2017), sendo este classificado como franco-arenoso (Tabela 1). Em seguida, procedeu-se à calagem, com aplicação de 0,44 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 98%), com o objetivo de elevar a saturação por bases (V%) para 60% (Teixeira et al., 2017).

Tabela 1. Características físico-químicas do substrato utilizado no experimento

pH – H ₂ O	S-SO ₄	P	K	Ca	Mg	H+Al	C	MO	CTC
-	-----mg dm ⁻³ ----				-----mmol _c dm ⁻³ -----		g dm ⁻³	dag kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³
5,2	10	5	1,20	16,30	14,40	29,20	7,20	1,24	62,0
SB	V	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Areia	Silte	Argila
mmol _c dm ⁻³	%				-----mg dm ⁻³ -----			-----%-----	
32,80	53	160,61	1,07	2,98	28,46	0,10	66,3	16,5	17,2

pH em água; P; Na; K; Fe; Zn; Mn; Cu – Extrator: Mehlich 1, Ca; Mg; Al- Extrator: KCl 1 mol L⁻¹, H+Al – Extrator: Acetato de Cálcio 0,5 mol L – pH 7,0, B – Extrator: Água quente; S - Extrator: Fosfato monoácido, SB - Soma de bases trocáveis, CTC – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0, V - Índice de saturação de bases, C- Carbono orgânico, MO – Matéria orgânica = C. Org x 1,724 – Walkley-Black.

O resíduo da produção de ácido láctico utilizado foi proveniente da empresa Corbion, localizada no município de Campos dos Goytacazes (RJ).

O material foi utilizado imediatamente após o recebimento, não sendo submetido a qualquer tipo de tratamento adicional.

Simultaneamente ao recebimento, foi coletada uma amostra para a determinação dos teores de nutrientes, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) (Tabela 2).

Tabela 2. Características químicas do resíduo da produção de ácido láctico usado no experimento

pH – H ₂ O	PMS	N	P	K	Ca	Mg	S
-	%	-----g kg ⁻¹ -----					
2,46	74,76	0,08	0,07	0,11	79,76	0,06	19,55
Cu	Mo	Ni	Zn	B	Mn	Fe	
-----mg kg ⁻¹ -----							
nd	nd	nd	6,00	nd	2,10	220,20	

pH em água; N total: Kjeldahl; PMS - Percentual de massa sólida: NBR 6457/2016; P, K, Ca, Ms e S: ICP-MS EPA 6020 B / 200.8; nd- não detectável.

Após o plantio das mudas, os vasos foram irrigados diariamente por sistema de gotejamento, com vazão de 1,2 L h⁻¹ durante 15 minutos, conforme recomendado para a cultura do abacaxizeiro (Souza e Reinhardt, 2007).

No tratamento controle, foram realizadas três adubações, conforme recomendação de Souza e Oliveira (2021) para o abacaxizeiro irrigado, com base na análise de solo. A primeira aplicação ocorreu aos 30 dias após o plantio, com 60, 52,4 e 83 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), respectivamente. A segunda foi realizada aos 120 dias após o plantio, com 80 e 83 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente, e a terceira aos 180 dias após o plantio, com 90 e 91,3 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente.

Os fertilizantes utilizados foram ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, como fontes de N, P e K, respectivamente.

Aos 220 dias após o plantio, foi realizada a coleta do experimento, seguida das análises biométricas, nutricionais e de fertilidade e microbiologia do substrato.

Análise química do substrato

Ao final do experimento, foi realizada a análise química do substrato. A coleta foi efetuada em cada vaso com o auxílio de um amostrador do tipo sonda, ao longo de todo o perfil do vaso, a 2 cm de distância da borda. Foram retiradas duas amostras simples por vaso em cada unidade experimental, as quais foram posteriormente homogeneizadas, originando uma amostra composta por unidade experimental.

Foram determinados o pH em água (pH H₂O), matéria orgânica (MO), acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva (t), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T), saturação por bases (V%) e os teores de fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), boro (B), ferro

(Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu), conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Contagem da população microbiana

Foi realizada a quantificação da população microbiana do substrato ao final do experimento, utilizando-se o método de contagem de unidades formadoras de colônias (UFC). Esse método consiste na inoculação de uma suspensão do substrato em placas de Petri estéreis contendo meio de cultura específico para o crescimento microbiano. Para bactérias, foi utilizado o meio de Bunts e Rovira (1995), com pH ajustado para 6,8, e para fungos, o meio de Martin (1950), com pH 6,0 antes da autoclavagem (Martin, 1950).

Inicialmente, foram coletadas quatro amostras simples por vaso, a 5 cm da borda e 10 cm de profundidade, totalizando oito amostras simples por unidade experimental. Essas amostras foram homogeneizadas, constituindo uma amostra composta. Em seguida, as amostras foram mantidas sob refrigeração a -4°C por 15 dias. Após esse período, foram peneiradas em malha de 2 mm, sendo separados 10 g para determinação da massa de solo seco (secagem por 72h a 100°C) e outros 10 g para a realização da diluição seriada.

Para a diluição, o material foi transferido para frascos Erlenmeyer contendo 90 mL de solução salina esterilizada (0,85%), constituindo a primeira diluição. Posteriormente, foram realizadas diluições sucessivas.

As inoculações foram realizadas em placas contendo meio de cultura, pipetando-se, em triplicata, 0,1 mL das diluições de 10^{-1} a 10^{-6} para bactérias e de 10^{-1} a 10^{-5} para fungos. As placas foram incubadas em estufa tipo BOD a 28°C por 48h para bactérias e 120h para fungos.

Após a incubação, foram selecionadas as diluições de 10^{-3} e 10^{-1} para bactérias e fungos, respectivamente, por apresentarem contagens dentro da faixa recomendada pela literatura, entre 30 e 300 colônias por placa.

A quantidade de microrganismos foi expressa em unidades formadoras de colônias por grama de solo (UFC g^{-1}), sendo calculada conforme a equação 1.

$$\text{UFC g}^{-1}\text{de solo} = \frac{[\text{N}^{\circ}\text{ de colônias} \times \left(\frac{1}{\text{diluição}}\right) \times \left(\frac{1}{\text{alíquota}}\right)]}{\text{massa do solo seco}} \quad (3)$$

Quantificação dos teores nutricionais

Para a determinação dos teores nutricionais, foram utilizadas folhas “D” inteiras, as quais foram previamente limpas com algodão umedecido em água deionizada e, após secagem, moídas em moinho de facas do tipo Willey.

Em seguida, foram pesados 0,1 g do material seco para a análise dos nutrientes minerais. Para a quantificação dos teores de nitrogênio amoniacal (N) e fósforo (P), as amostras foram submetidas à digestão sulfúrica. No extrato obtido, o N foi determinado pelo método de Nessler, com leitura em espectrofotômetro Specord® a 480 nm (Jackson, 1958), e o P foi determinado a 725 nm.

Os nutrientes potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) foram determinados após digestão aberta com ácido nítrico (HNO_3) concentrado e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), enquanto o boro (B) foi analisado por digestão seca, conforme metodologias descritas por Malavolta et al. (1997) e Miyazawa et al. (2009). Os nutrientes foram determinados em plasma (ICPE-9000) Shimadzu® (Peters, 2005).

Avaliação do crescimento vegetal

Após a coleta, foram avaliados o comprimento da parte aérea (CPA), o número de folhas (NF) e o diâmetro do coleto (DC) das plantas, além do comprimento (CFD), da largura (LFD) e da área foliar (AFFD) da folha “D”.

Em seguida, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72h. Após a secagem, o material foi pesado para determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR) e matéria seca da folha “D” (MSFD).

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variâncias de Bartlett, ambos a 5% de significância.

Após o atendimento desses pressupostos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando significativa, os dados foram submetidos à análise de regressão para estimativa do modelo mais adequado.

Adicionalmente, foi aplicado o teste de Dunnett para comparação das doses com o tratamento adicional (controle), também a 5% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 4.4.2), com auxílio do pacote “Tratamentos.ad”, enquanto a elaboração dos gráficos foi realizada no software SigmaPlot (versão 14.5).

Para as populações de microrganismos, os dados foram transformados em logaritmo antes da análise de variância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fertilidade do substrato

Nos parâmetros de fertilidade do substrato, observou-se que apenas a capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva, t) e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) foram influenciadas pela aplicação das doses do resíduo da produção de ácido láctico.

Ambas se ajustaram aos modelos quadráticos de regressão, com valores máximos estimados de $3,60 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e $6,69 \text{ cmolc dm}^{-3}$ nas doses de 6,90 e 8,85 t ha^{-1} , respectivamente (Figuras 2A e 2B).

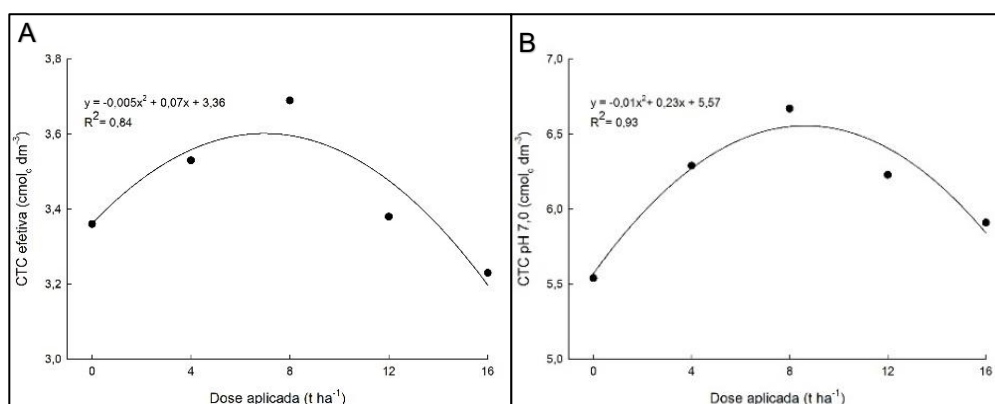


Figura 2. Parâmetros de fertilidade do substrato fertilizado com resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias – CTC efetiva (A), CTCT pH 7,0 (B).

O ajuste quadrático observado para a capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva, t) e para a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) indica que a aplicação do resíduo da produção de ácido láctico promoveu aumento temporário da capacidade de troca do substrato até doses intermediárias, seguido de estabilização. Esse comportamento é típico de sistemas com baixa fração coloidal, nos quais a CTC responde mais à ocupação dos sítios de troca por cátions básicos, especialmente Ca^{2+} , do que à formação de novas cargas permanentes (Teixeira et al., 2017).

Resultados semelhantes foram observados em estudos com aplicação de resíduos ricos em cálcio em curto prazo, nos quais o efeito sobre a CTC está associado principalmente à saturação das cargas existentes (Pralon e Martins, 2001).

Os valores de acidez potencial ($H + Al$), pH, soma de bases (SB), saturação por bases (V%) e teor de matéria orgânica (MO) não foram influenciados significativamente pelas doses aplicadas, apresentando valores médios de 2,58 cmolc dm^{-3} ; 5,44; 6,45 cmolc dm^{-3} ; 55,81% e 1,40 dag kg^{-1} , respectivamente.

Na comparação com o tratamento adicional, os valores de pH, a partir da dose de 4 t ha^{-1} até a dose máxima aplicada, foram superiores ao controle, enquanto a acidez potencial apresentou valores inferiores na menor dose e nas maiores doses (Tabela 3).

Tabela 3. Fertilidade do substrato em função da aplicação de doses do resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	pH (H ₂ O)	MO dag kg ⁻¹	H+Al	SB	t	T	V
	-		-----	cmolc dm ⁻³ -----			%
Controle	5,08	1,34	3,20	3,38	3,70	6,71	50,27
0 t ha ⁻¹	5,40 ^{ns}	1,34 ^{ns}	2,40 ⁻	3,11 ^{ns}	3,36 ^{ns}	5,54 ^{ns}	55,18 ^{ns}
4 t ha ⁻¹	5,48 ⁺	1,53 ^{ns}	2,83 ^{ns}	3,36 ^{ns}	3,53 ^{ns}	6,29 ^{ns}	53,36 ^{ns}
8 t ha ⁻¹	5,43 ⁺	1,34 ^{ns}	2,68 ^{ns}	3,88 ^{ns}	3,69 ^{ns}	6,67 ^{ns}	57,81 ^{ns}
12 t ha ⁻¹	5,43 ⁺	1,53 ^{ns}	2,43 ⁻	3,66 ^{ns}	3,38 ^{ns}	6,23 ^{ns}	58,14 ^{ns}
16 t ha ⁻¹	5,48 ⁺	1,25 ^{ns}	2,58 ⁻	3,22 ^{ns}	3,23 ^{ns}	5,91 ^{ns}	54,58 ^{ns}
CV(%)	3,17	11,44	11,39	17,72	7,02	11,86	7,25

+Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

O aumento do pH do substrato em relação ao tratamento controle evidencia o efeito corretivo do resíduo da produção de ácido láctico, associado à elevada concentração de cálcio (Ca) presente em sua composição. A redução pontual da acidez potencial ($H + Al$) em algumas doses reforça esse comportamento, indicando neutralização parcial de H^+ e Al^{3+} . No entanto, a ausência de variação significativa entre as doses sugere que o efeito corretivo do resíduo ocorreu de forma limitada no período avaliado, sem promover alterações expressivas nos demais atributos relacionados à acidez do substrato (Pralon e Martins, 2001).

Em relação aos teores de macronutrientes no substrato, observa-se que apenas o fósforo (P) não foi influenciado significativamente pelas doses aplicadas, apresentando média geral de 4,25 mg dm^{-3} . Por outro lado, os teores de potássio (K),

cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) foram significativamente influenciados, ajustando-se a modelos lineares de regressão.

Os teores de K e Mg apresentaram comportamento decrescente com o aumento das doses, com reduções de até 21,25% e 75,79%, respectivamente. Em contrapartida, os teores de Ca e S aumentaram linearmente, com incrementos de até 43,27% e 95,83%, respectivamente (Figuras 3A, 3B, 3C e 3D).

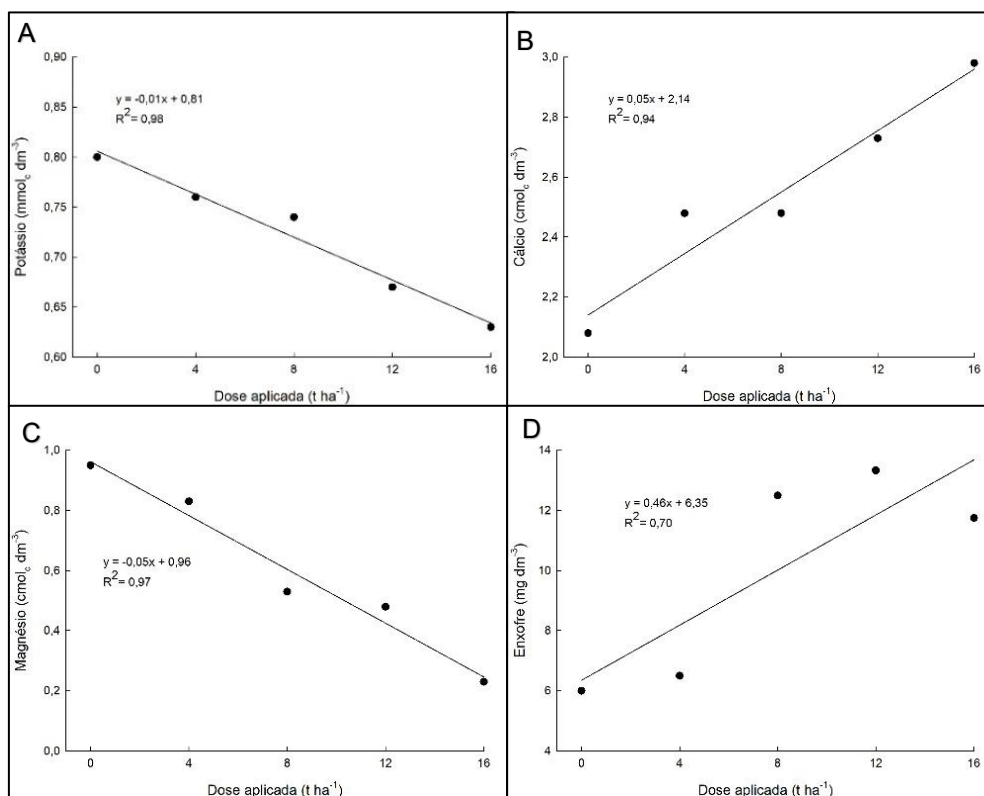


Figura 3. Teores de macronutrientes no substrato fertilizado com resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias - Potássio (A), cálcio (B), magnésio (C) e enxofre (D).

A ausência de resposta dos teores de fósforo (P) à aplicação do resíduo da produção de ácido láctico está de acordo com a baixa concentração desse nutriente no resíduo, indicando sua limitada capacidade de fornecimento direto ao substrato. Esse comportamento confirma que o resíduo da produção de ácido láctico não atua como fonte fosfatada, devendo ser considerado como insumo complementar no manejo da fertilidade, especialmente em sistemas com elevada exigência nutricional, como o abacaxizeiro, cultura reconhecidamente responsiva à disponibilidade de P no solo (Caetano et al., 2013, Oliveira et al., 2015, Cunha et al., 2019).

Resultados semelhantes têm sido relatados para resíduos ricos em cálcio (Ca), nos quais o aumento da fertilidade está associado principalmente à correção química do substrato, sem incremento significativo nos teores de P disponível (Prado et al., 2013, Gonçalves et al., 2021).

O incremento linear dos teores de Ca no substrato confirma a eficiência do resíduo da produção de ácido láctico como fonte desse nutriente, refletindo diretamente sua composição química, caracterizada pela predominância de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esse comportamento já foi observado em estudos anteriores, nos quais o fornecimento de Ca contribuiu para a melhoria das condições químicas do substrato e para o suprimento nutricional das plantas (Pralon e Martins, 2001).

O aumento da disponibilidade de Ca no solo pode favorecer a estruturação do sistema radicular e a estabilidade do ambiente edáfico, além de atuar na neutralização de cargas negativas e na redução da toxicidade de elementos potencialmente prejudiciais ao desenvolvimento vegetal (Malavolta et al., 1997, Sposito, 1989).

O aumento dos teores de enxofre (S) com a aplicação das doses do resíduo da produção de ácido láctico também reflete a composição do resíduo, indicando seu potencial como fonte alternativa desse nutriente. O S desempenha papel fundamental no metabolismo vegetal, participando da síntese de aminoácidos sulfurados, proteínas e enzimas, sendo frequentemente negligenciado em programas de fertilização, sobretudo em sistemas irrigados e em solos de baixa capacidade de retenção (Malavolta et al., 1997, Rengel, 2015).

Em culturas tropicais de alta demanda nutricional, como o abacaxizeiro, o fornecimento adequado de S pode contribuir para a eficiência do aproveitamento do nitrogênio (N) e para a manutenção do equilíbrio nutricional das plantas (Crisóstomo e Naumov, 2009, Cunha et al., 2021).

A redução dos teores de potássio (K) com o aumento das doses do resíduo da produção de ácido láctico pode ser explicada pela ausência de fornecimento desse nutriente pelo resíduo, associada ao antagonismo iônico com o Ca. Em sistemas com elevada disponibilidade de Ca^{2+} , ocorre ocupação preferencial dos sítios de troca, deslocando o K^+ para a solução do solo e aumentando sua suscetibilidade à lixiviação, especialmente em substratos de baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e sob irrigação frequente (Rietra et al., 2017, Xie et al., 2021).

Comportamento semelhante foi observado para o magnésio (Mg), cuja redução pode estar relacionada ao antagonismo com o Ca em ambientes com elevada

relação Ca:Mg. O excesso relativo de Ca^{2+} na solução do solo tende a limitar a retenção e a absorção de Mg^{2+} , especialmente em substratos arenosos, favorecendo perdas e reduzindo sua disponibilidade (Qu et al., 2023).

Quanto aos micronutrientes, com exceção do cobre (Cu), que não foi influenciado significativamente pelas doses aplicadas, apresentando média geral de $0,96 \text{ mg dm}^{-3}$, os teores de ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e boro (B) ajustaram-se a modelos quadráticos de regressão. Foram estimados valores máximos de 430,02; 31,53; 2,49 e $0,17 \text{ mg dm}^{-3}$ nas doses de 7,64; 7,64; 7,00 e $8,75 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D).

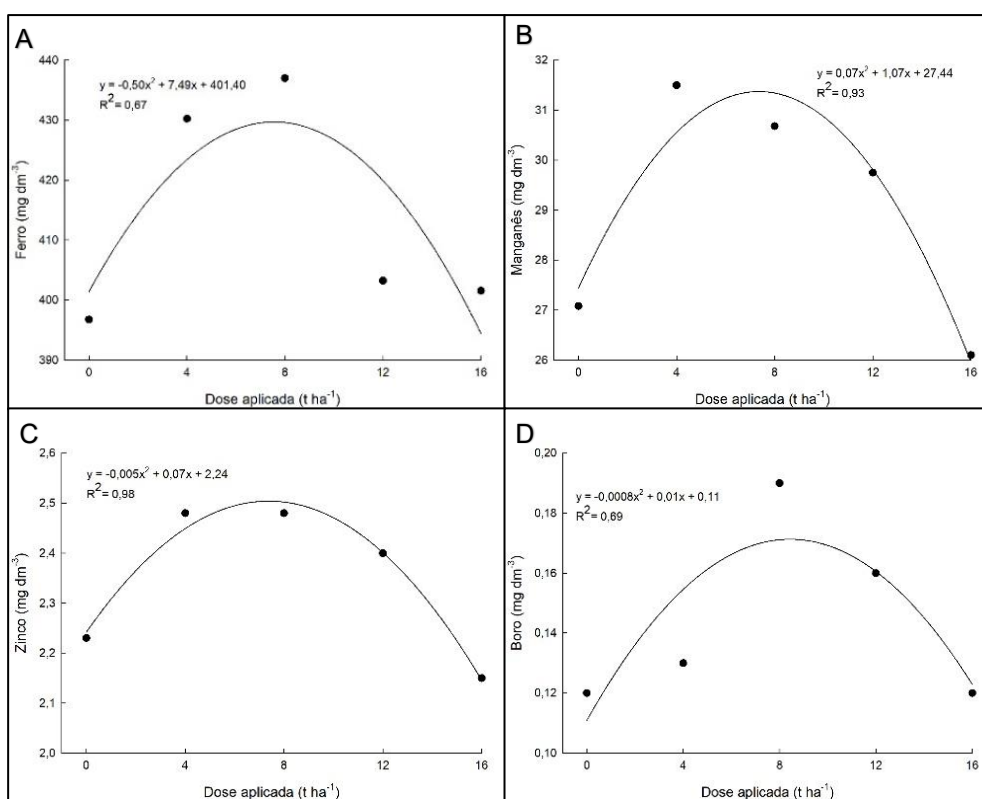


Figura 4. Teores de micronutrientes no substrato fertilizado com resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias - Ferro (A), Manganês (B), Zinco (C) e Boro (D).

As respostas quadráticas observadas para ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) indicam que a aplicação do resíduo da produção de ácido láctico alterou a disponibilidade desses micronutrientes no substrato, com valores máximos em doses intermediárias. Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, às alterações no pH e ao aumento da concentração de cálcio (Ca) na solução do solo, fatores que influenciam diretamente a solubilidade e a adsorção desses elementos. Em doses

mais elevadas, o aumento do pH tende a reduzir a disponibilidade desses micronutrientes, o que explica o decréscimo observado (Rengel, 2015).

O comportamento não linear do boro (B) pode ser explicado pela forte dependência desse micronutriente em relação ao pH e à presença de Ca no sistema. Em ambientes com maior concentração de Ca^{2+} , a adsorção de B pode ser intensificada, reduzindo sua disponibilidade na solução do solo, o que justifica a resposta quadrática observada (Goldberg, 1997).

Na comparação com o tratamento adicional (controle), observa-se que os teores de fósforo (P) e potássio (K) foram inferiores em todas as doses do resíduo da produção de ácido láctico, assim como os teores de magnésio (Mg) a partir da dose de 8 t ha^{-1} . Por outro lado, os teores de cálcio (Ca) foram superiores ao controle a partir da dose de 4 t ha^{-1} .

Para os micronutrientes, não foram observadas diferenças significativas em relação ao tratamento controle em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 4).

Tabela 4. Fertilidade do substrato em função da aplicação de doses do resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	P ---mg dm ⁻³ ---	S mmol _c dm ⁻³	K mmol _c dm ⁻³	Ca ---cmol _c dm ⁻³ ---	Mg ---cmol _c dm ⁻³ ---	B -----mg dm ⁻³ -----	Cu	Fe	Mn	Zn
Controle	8,75	10,25	9,82	1,90	0,85	0,15	0,98	392,75	30,48	2,18
0 t ha ⁻¹	4,25 ⁻	6,00 ^{ns}	0,80 ⁻	2,08 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,05 ^{ns}	396,75 ^{ns}	27,08 ^{ns}	2,23 ^{ns}
4 t ha ⁻¹	4,00 ⁻	6,50 ^{ns}	0,76 ⁻	2,48 ⁺	0,83 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,88 ^{ns}	430,25 ^{ns}	31,50 ^{ns}	2,48 ^{ns}
8 t ha ⁻¹	4,50 ⁻	12,50 ^{ns}	0,74 ⁻	2,48 ⁺	0,53 ⁻	0,19 ^{ns}	1,05 ^{ns}	437,00 ^{ns}	30,68 ^{ns}	2,48 ^{ns}
12 t ha ⁻¹	4,25 ⁻	13,33 ^{ns}	0,67 ⁻	2,73 ⁺	0,48 ⁻	0,16 ^{ns}	0,90 ^{ns}	403,25 ^{ns}	29,75 ^{ns}	2,40 ^{ns}
16 t ha ⁻¹	4,25 ⁻	11,75 ^{ns}	0,63 ⁻	2,98 ⁺	0,23 ⁻	0,12 ^{ns}	0,90 ^{ns}	401,55 ^{ns}	26,10 ^{ns}	2,15 ^{ns}
CV(%)	15,20	21,83	5,41	6,78	20,58	24,62	15,86	6,14	11,49	6,84

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

População de microrganismos

A população microbiana do substrato não foi influenciada significativamente pelas doses do resíduo da produção de ácido láctico, apresentando médias gerais de log 4,44 unidades formadoras de colônias por grama de solo (UFC g⁻¹) para a população de bactérias e log 3,96 UFC g⁻¹ para a população de fungos.

Na comparação com o tratamento adicional (controle), não foram observadas diferenças significativas para as populações de bactérias e fungos em nenhuma das doses avaliadas, de acordo com o teste de Dunnett (Tabela 5).

Tabela 5. Unidades formadoras de colônias (UFC) no substrato em função da aplicação de doses do resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	Bactérias	Fungos
-----Log UFC g ⁻¹ -----		
Controle	4,61	3,92
0 t ha ⁻¹	4,52 ^{ns}	4,06 ^{ns}
4 t ha ⁻¹	4,34 ^{ns}	3,93 ^{ns}
8 t ha ⁻¹	4,41 ^{ns}	3,94 ^{ns}
12 t ha ⁻¹	4,46 ^{ns}	4,06 ^{ns}
16 t ha ⁻¹	4,47 ^{ns}	3,96 ^{ns}
CV(%)	5,07	2,58

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

A ausência de efeito significativo das doses do resíduo da produção de ácido láctico sobre a população microbiana do substrato pode ser atribuída à natureza predominantemente mineral do resíduo, que apresenta baixo teor de carbono orgânico e, portanto, limitada capacidade de estimular diretamente a atividade microbiana (Lazcano et al., 2013).

Além disso, respostas mais expressivas da microbiota do solo geralmente estão associadas a pulsos temporais de disponibilidade de substrato e à dinâmica do sistema, podendo não ser detectadas em avaliações pontuais e de curto prazo, especialmente em condições de cultivo em vasos (Kuznyakov e Blagodatskaya, 2015).

A ausência de diferenças em relação ao tratamento adicional (controle) reforça que o resíduo da produção de ácido láctico não altera de forma significativa a abundância de bactérias e fungos, comportamento esperado para resíduos que atuam predominantemente como fontes minerais de nutrientes, com efeitos mais pronunciados sobre os atributos químicos do que sobre os biológicos do substrato (Pralon e Martins, 2001).

O equilíbrio entre as populações bacteriana e fúngica indica que a aplicação do resíduo da produção de ácido láctico não promoveu desequilíbrios na microbiota do substrato, sugerindo ausência de efeitos inibitórios ou tóxicos associados ao resíduo (Nannipieri et al., 2017).

Por fim, deve-se considerar que a metodologia de contagem de unidades formadoras de colônias (UFC) quantifica apenas a fração cultivável da microbiota, não refletindo plenamente possíveis alterações na diversidade ou na atividade metabólica dos microrganismos do solo (Nannipieri et al., 2017).

Teores nutricionais na folha “D”

Os teores nutricionais na folha “D” do abacaxizeiro foram influenciados pela aplicação das doses do resíduo da produção de ácido láctico.

Não foram observadas diferenças significativas para os macronutrientes fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), que apresentaram médias gerais de 2,51; 14,95 e 1,93 g kg⁻¹, respectivamente. Da mesma forma, os micronutrientes zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn) e boro (B) não foram influenciados pelas doses, apresentando médias gerais de 8,70; 5,90; 163,80 e 28,05 mg kg⁻¹, respectivamente.

Os teores de cálcio (Ca) ajustaram-se a modelo de regressão linear crescente, com incremento de até 62,5% na maior dose aplicada. Em contrapartida, os teores de nitrogênio (N), magnésio (Mg) e ferro (Fe) apresentaram comportamento linear decrescente, com reduções de até 19,1%, 32,17% e 38%, respectivamente, com o aumento das doses do resíduo da produção de ácido láctico (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D).

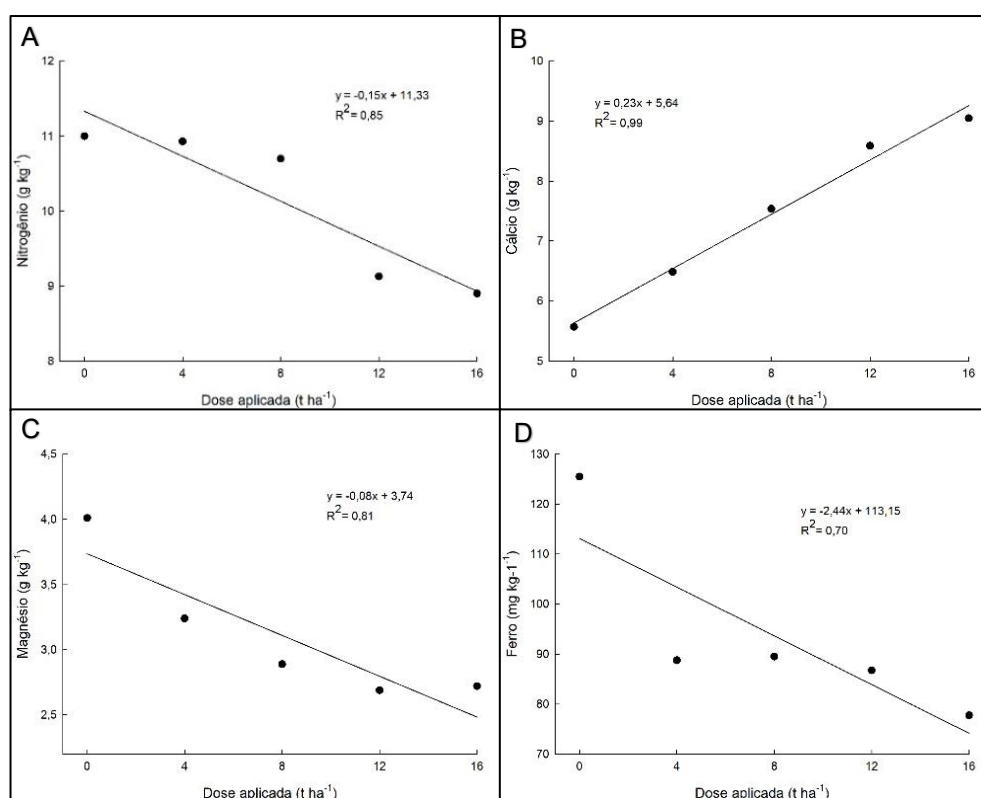


Figura 5. Teores nutricionais na folha “D” de plantas de abacaxi fertilizadas com resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias - Nitrogênio (A), Cálcio (B), Magnésio (C) e Ferro (D).

A redução dos teores foliares de nitrogênio (N) com o aumento das doses do resíduo da produção de ácido láctico era esperada, considerando o baixo teor desse nutriente no resíduo. O resíduo da produção de ácido láctico não atua como fonte

relevante de N, sobretudo para uma cultura exigente como o abacaxizeiro na fase vegetativa (Omotoso e Akinrinde, 2013). Esse comportamento reforça a necessidade de complementação nitrogenada quando o resíduo é utilizado de forma isolada, conforme recomendado para a cultura (Souza e Oliveira, 2021).

Os teores foliares de fósforo (P) não apresentaram variação significativa entre as doses, acompanhando o comportamento observado no substrato. O baixo teor de P no resíduo da produção de ácido láctico limita seu fornecimento às plantas, não sendo suficiente para alterar o estado nutricional da folha “D” (Souza e Oliveira, 2021), o que indica que o resíduo não substitui fontes fosfatadas convencionais.

Para o potássio (K), apesar da redução observada no substrato, os teores foliares mantiveram-se relativamente estáveis. O abacaxizeiro apresenta capacidade de regular a absorção e a redistribuição interna de K, o que contribui para a manutenção dos níveis foliares mesmo em condições de menor disponibilidade no meio de crescimento (Cunha et al., 2021).

Os teores foliares de cálcio (Ca) aumentaram de forma linear com a aplicação das doses do resíduo da produção de ácido láctico, refletindo diretamente a maior disponibilidade desse nutriente no substrato. O Ca presente no resíduo foi absorvido pelas plantas e acumulado nos tecidos foliares, comportamento esperado diante da elevada concentração desse elemento no resíduo da produção de ácido láctico (Pralon e Martins, 2001), confirmando seu potencial como fonte de cálcio para o abacaxizeiro.

Em relação ao magnésio (Mg), observou-se redução dos teores foliares com o aumento das doses. Esse comportamento pode estar associado ao desequilíbrio nutricional causado pelo excesso relativo de Ca no sistema, que tende a limitar a absorção de Mg pelas plantas (Malavolta et al., 1997). Ainda assim, os valores observados permaneceram dentro de faixas consideradas adequadas para a cultura (Souza e Oliveira, 2021).

Os teores foliares de enxofre (S) não foram influenciados pelas doses aplicadas, mesmo com o incremento desse nutriente no substrato. Esse resultado indica que o suprimento de S foi suficiente em todas as condições avaliadas, sem resultar em acúmulo adicional nos tecidos vegetais.

Para os micronutrientes ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) e boro (B), não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Esse comportamento sugere que a disponibilidade desses elementos no substrato foi suficiente para atender à demanda das plantas, mantendo os teores foliares dentro

das faixas de suficiência estabelecidas para a cultura (Malavolta et al., 1997, Miyazawa et al., 2009).

Na comparação com o tratamento adicional (controle), observou-se que os teores foliares de N foram inferiores em todas as doses do resíduo da produção de ácido láctico. Por outro lado, os teores de Ca foram superiores ao controle a partir da dose de 8 t ha⁻¹, enquanto os teores de Mg foram superiores apenas na dose de 0 t ha⁻¹. Os teores de S foram superiores ao controle em todas as doses avaliadas (Tabela 6).

Tabela 6. Teores de macronutrientes na folha “D” do abacaxizeiro ‘BRS Imperial’ em função da aplicação de doses de torta de filtro, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Controle	13,95	2,58	17,55	4,69	3,05	1,57	25,50	92,00	180,75	9,00	6,00
0 t ha ⁻¹	11,00 ⁻	2,43 ^{ns}	14,79 ^{ns}	5,57 ^{ns}	4,01 ⁺	1,91 ⁺	29,00 ^{ns}	125,50 ^{ns}	164,50 ^{ns}	8,75 ^{ns}	6,00 ^{ns}
4 t ha ⁻¹	10,93 ⁻	2,73 ^{ns}	15,93 ^{ns}	6,49 ^{ns}	3,24 ^{ns}	1,97 ⁺	31,25 ^{ns}	88,75 ^{ns}	156,50 ^{ns}	9,25 ^{ns}	6,25 ^{ns}
8 t ha ⁻¹	10,70 ⁻	2,33 ^{ns}	15,28 ^{ns}	7,54 ⁺	2,89 ^{ns}	1,91 ⁺	26,25 ^{ns}	89,50 ^{ns}	165,50 ^{ns}	9,00 ^{ns}	5,75 ^{ns}
12 t ha ⁻¹	9,13 ⁻	2,73 ^{ns}	14,79 ^{ns}	8,59 ⁺	2,69 ^{ns}	1,98 ⁺	27,75 ^{ns}	86,75 ^{ns}	169,25 ^{ns}	8,00 ^{ns}	6,00 ^{ns}
16 t ha ⁻¹	8,90 ⁻	2,35 ^{ns}	13,98 ^{ns}	9,05 ⁺	2,72 ^{ns}	1,88 ⁺	26,00 ^{ns}	77,75 ^{ns}	163,25 ^{ns}	8,50 ^{ns}	5,50 ^{ns}
CV(%)	12,58	9,75	12,25	13,87	12,71	7,58	12,93	23,44	8,25	17,04	11,55

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

Na comparação com o tratamento com adubação convencional, observa-se que o uso exclusivo do resíduo da produção de ácido láctico não foi suficiente para suprir adequadamente nutrientes como nitrogênio (N) e potássio (K), enquanto o fornecimento de cálcio (Ca) foi favorecido.

Esses resultados reforçam que o resíduo da produção de ácido láctico deve ser considerado um insumo complementar no manejo da fertilidade do substrato e da nutrição do abacaxizeiro, não devendo ser utilizado como fonte exclusiva de nutrientes.

Crescimento vegetal

A maioria das variáveis de crescimento não foi influenciada significativamente pela fertilização com o resíduo da produção de ácido láctico. Assim, o número de folhas (NF), diâmetro do coleto (DC), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), largura da folha “D” (LFD), comprimento da folha “D” (CFD), área foliar da folha “D” (AFFD) e massa seca da folha “D” (MSFD) apresentaram médias gerais de

28,19 unidades, 24,15 mm, 36,68 g, 9,47 g, 3,69 cm, 46,39 cm, 93,20 cm² e 2,04 g, respectivamente.

Dentre as variáveis avaliadas, apenas o comprimento da parte aérea (CPA) foi influenciado pela aplicação do resíduo da produção de ácido lático, apresentando incremento linear de 14,3% na maior dose (Figura 6).

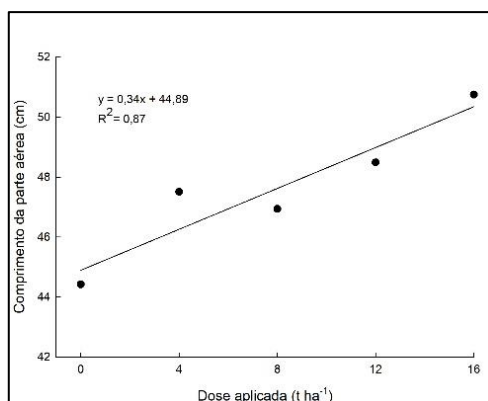


Figura 6. Comprimento da parte aérea (CPA) de plantas de abacaxi fertilizadas com resíduo da produção de ácido lático, aos 220 dias.

Esse resultado indica que o resíduo, quando utilizado de forma isolada, não promoveu alterações expressivas no desenvolvimento vegetativo do abacaxizeiro, comportamento esperado para uma cultura com elevada exigência nutricional, especialmente em nitrogênio (N) e potássio (K) (Souza e Reinhardt, 2007).

O número de folhas (NF) e o diâmetro do coleto (DC) mantiveram-se semelhantes entre os tratamentos, sugerindo que o suprimento nutricional proporcionado pelo resíduo da produção de ácido lático não foi suficiente para promover ganhos adicionais nessas variáveis. Essas características estão diretamente associadas ao estado nutricional e ao vigor das plantas, reforçando a limitação do resíduo quando utilizado sem complementação mineral (Souza e Oliveira, 2021).

Da mesma forma, a matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e da folha "D" (MSFD) não apresentaram variação significativa entre as doses. Esse comportamento indica que o uso exclusivo do resíduo da produção de ácido lático não comprometeu o crescimento das plantas, mas também não promoveu incremento de biomassa em relação ao manejo convencional, resultado semelhante ao observado em outros estudos com fertilização alternativa isolada no abacaxizeiro (Omotoso e Akinrinde, 2013).

O comprimento da parte aérea (CPA) foi a única variável de crescimento influenciada pelas doses do resíduo da produção de ácido láctico, apresentando incremento linear. Esse efeito pode estar relacionado ao fornecimento de cálcio (Ca) pelo resíduo, nutriente associado à integridade estrutural das células e ao crescimento dos tecidos vegetais, o que pode favorecer o alongamento da parte aérea, mesmo na ausência de resposta para outras variáveis (Malavolta et al., 1997).

As variáveis relacionadas à folha “D”, como comprimento (CFD), largura (LFD), área foliar (AFFD) e massa seca (MSFD), não responderam às doses aplicadas, indicando manutenção de um padrão semelhante de crescimento foliar entre os tratamentos. Esse resultado sugere que o resíduo da produção de ácido láctico não alterou a arquitetura foliar das plantas ao longo do período experimental (Souza e Oliveira, 2021).

Na comparação com o tratamento adicional (controle), pelo teste de Dunnett, observa-se que, com exceção do comprimento da parte aérea, no qual a dose de 0 t ha⁻¹ foi inferior ao controle, todas as demais variáveis não diferiram significativamente (Tabela 7).

Tabela 7. Crescimento do abacaxizeiro ‘Imperial’ em função da aplicação de doses do resíduo da produção de ácido láctico, aos 220 dias, após o plantio das mudas

Tratamento	MSPA	MSR	MSFD	NF	DC	CPA	LFD	CFD	AFFD
	-----g-----			-	mm	-----cm-----			cm ²
Controle	40,00	9,97	2,26	30,25	24,73	50,41	3,90	46,71	101,43
0 t ha ⁻¹	38,50 ^{ns}	8,78 ^{ns}	1,85 ^{ns}	28,88 ^{ns}	24,06 ^{ns}	44,42 ⁻	3,51 ^{ns}	44,44 ^{ns}	88,18 ^{ns}
4 t ha ⁻¹	33,52 ^{ns}	8,91 ^{ns}	2,00 ^{ns}	28,63 ^{ns}	23,94 ^{ns}	47,51 ^{ns}	3,74 ^{ns}	47,16 ^{ns}	94,21 ^{ns}
8 t ha ⁻¹	36,26 ^{ns}	8,30 ^{ns}	2,04 ^{ns}	27,88 ^{ns}	24,63 ^{ns}	46,94 ^{ns}	3,78 ^{ns}	46,17 ^{ns}	94,93 ^{ns}
12 t ha ⁻¹	36,66 ^{ns}	10,56 ^{ns}	2,11 ^{ns}	27,81 ^{ns}	23,88 ^{ns}	48,49 ^{ns}	3,60 ^{ns}	46,13 ^{ns}	91,58 ^{ns}
16 t ha ⁻¹	38,44 ^{ns}	10,79 ^{ns}	2,19 ^{ns}	27,75 ^{ns}	24,25 ^{ns}	50,75 ^{ns}	3,84 ^{ns}	48,06 ^{ns}	97,10 ^{ns}
CV(%)	16,43	28,92	16,67	9,41	5,85	5,15	7,80	7,19	12,10

+ Significativo e superior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

- Significativo e inferior à testemunha (Controle), pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade;

ns Não significativo, pelo teste de Dunnett, em nível de 5% de probabilidade.

Na comparação com o tratamento adicional (controle), observa-se que o crescimento das plantas fertilizadas exclusivamente com o resíduo da produção de ácido láctico foi, de modo geral, semelhante ao obtido com a adubação mineral, com exceção pontual do comprimento da parte aérea (CPA) na menor dose.

Esses resultados indicam que o resíduo pode ser utilizado sem prejuízos ao desenvolvimento do abacaxizeiro, porém não substitui integralmente a adubação

convencional quando o objetivo é maximizar o crescimento vegetal (Souza e Reinhardt, 2007).

CONCLUSÕES

A aplicação do resíduo da produção de ácido láctico promoveu alterações na fertilidade do substrato, com aumento dos teores de cálcio (Ca) e enxofre (S) e efeito positivo sobre a capacidade de troca de cátions (CTC), com respostas mais consistentes em doses intermediárias, entre 8 e 12 t ha⁻¹.

Quando utilizado de forma isolada, o resíduo não supriu adequadamente todos os nutrientes exigidos pelo abacaxizeiro, refletindo-se em respostas limitadas no crescimento e na redução dos teores foliares de nitrogênio (N) e magnésio (Mg), especialmente nas maiores doses.

Dessa forma, o resíduo da produção de ácido láctico deve ser considerado um insumo complementar no manejo da fertilidade do substrato e da nutrição do abacaxizeiro, sendo as doses entre 8 e 12 t ha⁻¹ as mais adequadas do ponto de vista químico, sobretudo como fonte de Ca e S, devendo ser associado à adubação mineral.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo fomento à pesquisa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, R.A., Joshi, J., Abdullah, S. (2023) A comprehensive review of pineapple processing and its by-product valorization in India. *Food Chemistry Advances*, 3:100416-1.
- Basheer, S., Wang, X., Farooque, A.A., Nawaz, R.A., Pang, T., Neokye, E.O. (2024) A review of greenhouse gas emissions from agricultural soil. *Sustainability*, 16:4789-1.
- Bunts, J.S., Rovira, A.D. (1995) Microbiological studies of some subantarctic soils. *Journal of Soil Science*, 6:119-128.
- Caetano, L.C.S., Ventura, J.A., Costa, A.F.S., Guarçoni, R.C. (2013) Efeito da adubação com nitrogênio, fósforo e potássio no desenvolvimento, produção e qualidade de frutos do abacaxi 'Vitória'. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35:883-890.
- Crisóstomo, L.A., Naumov, A. (2009) Adubando para alta produtividade e qualidade: fruteiras tropicais do Brasil. Fortaleza, CE: Embrapa Agroindústria Tropical, 196p.
- Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Caetano, L.C.S., Carvalho, A.J.C., Peçanha, D.A., Santos, P.C. (2019) Qualidade de frutos de abacaxizeiro 'Vitória' sob deficiência de macronutrientes e boro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41:e555-1.
- Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Carvalho, A.J.C., Caetano, L.C.S., Vieira, M.E., Peçanha, D.A. (2021) Potassium fertilization in pineapple fruit quality. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 43:e018-1. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021018>.
- FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024) Crops and livestock products: pineapple production in 2023. Rome. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 10 de nov. de 2025.
- Goldberg, S. (1997) Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48.
- Gonçalves, C.A., Camargo, R. de, Sousa, R.T.X. de, Soares, N.S., Oliveira, R.C. de, Stanger, M.C., Lana, R.M.Q., Lemes, E.M. (2021) Chemical and technological attributes of sugarcane as a function of organomineral fertilizer based on filter cake or

sewage sludge. PLoS ONE, 16:e0236852-1.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236852>

Gunawardena, M.A., Lokupitiya, E. (2024) Comparison of conventionally and organically grown pineapple in Sri Lanka. *Cleaner Environmental Systems*, 14:100219-1.

Jackson, M.L. (1958) *Soil chemical analysis*. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 498p.

Kuzyakov, Y., Blagodatskaya, E. (2015) Microbial hotspots and hot moments in soil: concept and review. *Soil Biology and Biochemistry*, 83:184-199.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>

Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., Revilla, P., Domínguez, J. (2013) Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function. *Biology and Fertility of Soils*, 49:723-733. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0761-7>

Liao, F., Zheng, Y., Wang, X. (2025) Promoting the replacement of chemical fertilizer with organic fertilizer: the role of policy incentives and digital technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9:1527913-1. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527913>

Loures, D.S., Yamashita, O.M., Carvalho, M.A.C., Koga, P.S., Campos, O.R., Massaroto, J.A., Arantes, K.R., Felito, R.A., Gervazio, W., Rocha, A.M., Cândido, A.C.F.T. (2021) Cultivo do abacaxizeiro em função do parcelamento da adubação potássica de cobertura. *Research, Society and Development*, 10:e42510716722-1.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16722>

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de (1997) *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba, SP: POTAFOS, 319p.

Martin, J.P. (1950) Use of acid, rose bengal, and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Science*, 69:215-232.

Miyazawa, M., Pavan, M.A., Muraoka, T., Carmo, C.A.F.S., Melo, W.J. (2009) Análise química de tecido vegetal. In: Silva, F.C. da (ed.) *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.191-233.

- Mohd Ali, M., Hashim, N., Abd Aziz, S., Lasekan, O. (2022) Shelf life prediction and kinetics of quality changes in pineapple (*Ananas comosus*) varieties at different storage temperatures. *Horticulturae*, 8:e10992-1. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8110992>
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G., Renella, G. (2017) Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 68:12-26. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12398
- Nkolisa, Z., Mpambani, B., Mtamzeli-Cekiso, N., Ncama, K. (2025) Economic viability of organic fertilizers to improve growth, yield, and quality of pineapples in Africa: a review. *Horticulturae*, 11:636-1.
- Oliveira, A.M.G., Natale, W., Rosa, R.C.C., Junghans, D.T. (2015) NK fertilization in 'BRS Imperial' pineapple – II: plant production variables. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37:764-773. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-024/14>
- Omotoso, S.O., Akinrinde, E.A. (2013) Effect of nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality parameters in pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) at Ado-Ekiti, Nigeria. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 3:11-16.
- Peters, J.B. (2005) Wisconsin procedures for soil testing, plant analysis and feed and forage analysis: plant analysis. Madison: University of Wisconsin Extension. 304p. Disponível em: <https://datcp.wi.gov/Documents/NMProcedures.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.
- Prado, R.M., Caione, G., Campos, C.N.S. (2013) Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013:581984-1.
- Pralon, A.Z., Martins, M.A. (2001) Utilização do resíduo industrial Ferkal na produção de mudas de *Mimosa caesalpiniaefolia* em estéril de extração de argila, inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares e rizóbio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:55-63.
- Qu, S., Li, H., Zhang, X., Gao, J., Ma, R., Ma, L., Ma, J. (2023) Effects of magnesium imbalance on root growth and nutrient absorption in different genotypes of vegetable crops. *Plants*, 12:3518-1.

Rengel, Z. (2015) Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15:397-409.

Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S. (2017) Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 40:928-946. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>

Silva, S.D.O., Mafra, A.K.C., Pelissari, F.M., Lemos, L.R., Molina, G. (2025) Biotechnology in agro-industry: valorization of agricultural wastes, by-products and sustainable practices. *Microorganisms*, 13:1789-1.

Souza, L.F. da S., Oliveira, A.M.G. (2021) Calagem e adubação para o abacaxizeiro. In: Borges, A.L. (ed.) *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.95-122.

Souza, L.F. da S., Reinhardt, D.H. (2007) Pineapple. In: Crisóstomo, L.A., Naumov, A., Johnston, A.E. (eds.) *Fertilizing for high yield and quality tropical fruits of Brazil*. Horgen: International Potash Institute, p.179-201.

Sposito, G. (1989) *The chemistry of soils*. Oxford: Oxford University Press, 277p.

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (2017) *Manual de métodos de análise de solo*. 3.ed. Brasília: Embrapa, 573p.

Weifeng, Z., Weixiu, Y., Zhiling, M., Xiaoyan, Z., Ligu, C., Shenghui, L., Yanfang, Z. (2020) Effects of time and height of shading on yield and quality of pineapple. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 512:012101-1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/512/1/012101>

Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., Petersen, J. (2021) Synergistic and antagonistic interactions between magnesium and potassium in plants. *The Crop Journal*, 9:249-256.

4. CONCLUSÕES

Os resíduos agroindustriais avaliados apresentam potencial para uso agrícola no cultivo do abacaxizeiro 'BRS Imperial', atuando de forma complementar ao manejo convencional da fertilidade do solo e da nutrição das plantas.

A torta de filtro da cana-de-açúcar promoveu melhorias na fertilidade do substrato e no crescimento vegetal. No entanto, doses elevadas resultaram em redução da população microbiana, sendo as doses entre 20 e 40 t ha⁻¹ as mais adequadas, por proporcionarem melhor equilíbrio entre fertilidade, crescimento e atividade biológica.

O composto de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) melhorou a fertilidade do substrato e manteve a estabilidade da microbiota, sendo as doses entre 5 e 10 t ha⁻¹ as que apresentaram respostas agrônômicas mais equilibradas.

O resíduo da produção de ácido láctico atuou principalmente como fonte de cálcio (Ca) e enxofre (S), com efeito limitado sobre o crescimento vegetal quando utilizado isoladamente. As doses entre 8 e 12 t ha⁻¹ mostraram-se mais adequadas, promovendo melhorias químicas no substrato sem intensificar desequilíbrios nutricionais.

Nenhum dos resíduos avaliados foi capaz de suprir integralmente as exigências nutricionais do abacaxizeiro, sendo necessária a complementação com fertilizantes minerais, especialmente para nitrogênio (N) e potássio (K).

Dessa forma, recomenda-se a realização de estudos complementares envolvendo a combinação entre os diferentes resíduos, associada à adubação mineral, visando otimizar o manejo da fertilidade e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Khaliq, S. J., Al-Busaidi, A., Ahmed, M., Al-Wardy, M., Agrama, H., Choudri, B. S. (2017) The effect of municipal sewage sludge on the quality of soil and crops. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6:289-299. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0176-4>
- Abraham, R.A., Joshi, J., Abdullah, S. (2023) A comprehensive review of pineapple processing and its by-product valorization in India. *Food Chemistry Advances*, 3:100416-1
- Acevedo-Gómez, R., Sánchez-Hernández, M., Gómez-Merino, F., Ponce-Peña, P., González-Lozano, M.A., Navarro-Moreno, L., Poisot, M. (2020) Soil quality of *Ananas comosus* cultivation land in the Papaloapan Basin region of Mexico after wastes addition as fertilizer supplement. *Agriculture*, 10:173-1. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050173>
- AGEVAP – Agência da Bacia do Paraíba (2012) Estudos para identificação, localização e quantificação das causas da proliferação de plantas aquáticas ao longo da calha do rio Paraíba do Sul. Relatório técnico. Resende, RJ, 55p.
- Aili Hamzah, A.F., Hamzah, M.H., Che Man, H., Jamali, N.S., Siajam, S.I., Ismail, M.H. (2021) Recent updates on the conversion of pineapple waste (*Ananas comosus*) to value-added products, future perspectives and challenges. *Agronomy*, 11, 2221. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112221>
- Ali, A.M., Hegab, S.A., Abd El Gawad, A.M., Awad, M. (2022) Integrated effect of filter mud cake combined with chemical and biofertilizers to enhance potato growth and its yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22:455-464. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00661-3>
- Almeida Júnior, A.B.D., Nascimento, C.W., Sobral, M.F., Silva, F.B., Gomes, W.A. (2011) Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:1004-1013.

Aquino, A.M. de, Oliveira, A.M.G., Loureiro, D.C. (2005) Integrando compostagem e vermicompostagem na reciclagem de resíduos orgânicos domésticos. Circular Técnica 12. Embrapa, 4p.

Araújo, F.S., Leite, L.F.C., Souza, Z.M. de, Torres, J.L.R., Costa, A.S.H.B., Ferreira, A.H.C. (2017) Fertility and total organic carbon in Oxisol under different management systems in savannah of Piauí, Brazil. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20:165-172.

Bettiol, W., Silva, C. A., Cerri, C. E. P., Martin Neto, L., Andrade, C. A. de. (2023) Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa, 788 p.

Cabral, J.R.S., Matos, A.P. (2005) Imperial: nova cultivar de abacaxi. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 12p.

Caetano, L.C.S., Ventura, J.A., Costa, A.F.S., Guarçoni, R.C. (2013) Efeito da adubação com nitrogênio, fósforo e potássio no desenvolvimento, produção e qualidade de frutos do abacaxi 'Vitória'. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35:883-890.

Cai, Z., Wang, B., Xu, M., Zhang, H., He, X., Zhang, L., Gao, S. (2015) Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 15:260-270. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0989-y>

Caione, G., González, L.C., Prado, R.M., Hernandez, A.R., Moda, L.R., Selva, E.P., Nahas, E. (2018) Adubação fosfatada com torta de filtro, fosfato natural e biofertilizantes em Argissolo. *Ciencia del Suelo*, 35:110-116.

Campiteli, L.L., Santos, R.M., Lazarovits, G., Rigobelo, E.C. (2018) The impact of applications of sugar cane filter cake and vinasse on soil fertility factors in fields having four different crop rotations practices in Brazil. *Científica*, 46:42-48. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2018v46n1p42-48>

Carvalho, A.J.C., Freitas, M.S.M., Santos, P.C., Silva, M.S. (2019) Adubação e nutrição mineral. In: Santos, C.E.M., Borém, A. (eds.) *Abacaxi: do plantio à colheita*. Viçosa, MG: UFV, p.74-92.

Chaudhary, V., Kumar, V., Singh, K., Kumar, R., Kumar, V. (2019) Pineapple (*Ananas comosus*) product processing: a review. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 8:4642-4652.

Comineti, C., Schlindwein, M., Hoeckel, P. H. O. (2025) Uso de lodo de esgoto na agricultura e impactos na saúde pública no Brasil. International Journal of Agrarian Sciences – PDVAGRO, 5:79-91. <https://doi.org/10.31692/77demp51>

Conceição, M.A., Yamashita, O.M., Koga, P.S., Peres, W.M., David, G.Q., Teixeira, S.O. (2016) Quality and acceptance of pineapple as a result of potassic fertilization. Nativa, 4:368-374. DOI:10.31413/nativa.v4i6.3719

Criscione, K.S., Fields, J.S., Owen Jr., J.S., Fultz, L., Bush, E. (2022) Evaluating stratified substrates effect on containerized crop growth under varied irrigation strategies. HortScience, 57:400-413. DOI: 10.21273/HORTSCI16288-21

Crisóstomo, L.A., Naumov, A. (2009) Adubando para alta produtividade e qualidade: fruteiras tropicais do Brasil. Fortaleza, CE: Embrapa Agroindústria Tropical, 196p.

Crisóstomo, L.A., Naumov, A. (2019) Extração e exigência nutricional do abacaxizeiro. Revista Brasileira de Fruticultura, 41:e123-1.

Cunha, J.M. (2020) Qualidade de frutos e composição mineral de abacaxizeiro em função do fornecimento de nutrientes minerais. Tese de Doutorado em Produção Vegetal – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 180p.

Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Caetano, L.C.S., Carvalho, A.J.C., Peçanha, D.A., Santos, P.C. (2019) Qualidade de frutos de abacaxizeiro ‘Vitória’ sob deficiência de macronutrientes e boro. Revista Brasileira de Fruticultura, 41:e555-1.

Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Carvalho, A.J.C., Caetano, L.C.S., Vieira, M.E., Peçanha, D.A. (2021) Pineapple yield and fruit quality in response to potassium fertilization. Journal of Plant Nutrition, 44:1-8.

Cunha, J.M., Freitas, M.S.M., Carvalho, A.J.C., Caetano, L.C.S., Vieira, M.E., Peçanha, D.A. (2021) Potassium fertilization in pineapple fruit quality. Revista Brasileira de Fruticultura, 43:e018-1. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021018>

Dias, F.D.C. (2005) Dinâmica e disponibilidade de nutrientes e metais pesados em Planossolo tratado com resíduos industriais. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 98p.

Duong, T.T., Verma, S.L., Penfold, C., Marschner, P. (2013) Nutrient release from composts into the surrounding soil. *Geoderma*, 195:42-47.

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024) Crops and livestock products: pineapple production in 2023. Rome. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 22 dez. 2025.

Fassinou Hotegni, V.N., Lommen, W.J.M., Agbossou, E.K., Struik, P.C. (2014) Heterogeneity in pineapple fruit quality results from plant heterogeneity at flower induction. *Frontiers in Plant Science*, 5:670-1.

Fravet, P.R.F. de, Soares, R.A.B., Lana, R.M.Q., Lana, Â.M.Q., Korndörfer, G.H. (2010) Effect of filter cake doses and method of application on yield and technological quality of sugarcane ratoon. *Ciência e Agrotecnologia*, 34:618-624. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300013>

Ge, Y., Abdulkreem Al-Huqail, A., Zhou, Z., Ali, E.F., Ghoneim, A.M., Eissa, M., El-Sharkawy, M.S., Ding, Z. (2022) Plant growth stimulating bacteria and filter mud cake enhance soil quality and productivity of mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22:3068-3080. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00868-y>

Goldberg, S. (1997) Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48.

Gomes, M.D.P., Rezende, C.H.S., Souza, J.A., Rocha, G.C. (2022) Lixiviação de potássio em um Latossolo cultivado com café. *Irriga*, 27:597-606. <https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n3p597-606>

Gonçalves, C.A., Camargo, R. de, Sousa, R.T.X. de, Soares, N.S., Oliveira, R.C. de, Stanger, M.C., Lana, R.M.Q., Lemes, E.M. (2021) Chemical and technological attributes of sugarcane as a function of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge. *PLoS ONE*, 16:e0236852-1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236852>

Gonçalves, J.C., Neto, X.R.P., Nunes, E.H., Pecoraro, C.A., Gasparotto, F., Filho, J.T. (2023) Soybean fertilization with filter cake and its effects on soil chemical attributes. *Semina: Ciências Agrárias*, 44:755-766. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n2p755>

González, L.C., Prado, R.M., Hernández, A.R., Caione, G., Selva, E.P. (2014) Uso de torta de filtro enriquecida com fosfato natural e biofertilizantes em Latossolo Vermelho distrófico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44:135-141.

Gransee, A., Führes, H. (2013) Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368:5-21.

Guarçoni, A., Ventura, J.A. (2011) Adubação NPK e o desenvolvimento do abacaxizeiro 'Gold' (MD-2). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1367-1376.

Guedes, M.C. (2000) Efeito do lodo de esgoto sobre a nutrição e crescimento de sub-bosque em plantações de eucalipto. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 115p.

Gunawardena, M.A., Lokupitiya, E. (2024) Comparison of conventionally and organically grown pineapple in Sri Lanka: an integrative approach applying life cycle assessment and externalities. *Cleaner Environmental Systems*, 14:100219-1.

Hikal, W. M., Mahmoud, A. A., Said-Al Ahl, H. A. H., Bratovcic, A., Tkachenko, K. G., Kačániová, M., Rodriguez, R. M. (2021) Pineapple waste streams, characterisation and valorisation. *Open Journal of Ecology*, 11:610-634. DOI: 10.4236/oje.2021.119039

Hossain, M.F. (2016) World pineapple production: an overview. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 16:11443-11456. DOI: 10.18697/ajfand.76.15620

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2024) Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes 2024. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117->

producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html. Acesso em: 2 maio 2025.

Jackson, M.L. (1958) Soil chemical analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 498p.

Jovanović, M., Milutinović, M., Kostić, M., Miladinović, B., Kitić, N., Branković, S., Kitić, D. (2018) Antioxidant capacity of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) extracts and juice. *Lekovite Sirovine*, 38:27-30. <https://doi.org/10.5937/leksir1838027J>

Kuzyakov, Y., Blagodatskaya, E. (2015) Microbial hotspots and hot moments in soil: concept and review. *Soil Biology and Biochemistry*, 83:184-199. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>

Kuzyakov, Y., Domanski, G. (2000) Carbon input by plants into the soil: review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163:421-431. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R)

Lacerda, S.M.P., Silva, J.O., Rocha, F.A., Oliveira, J.T., Silva, T.O., Freitas Noronha, R.H., Santos, L.M. (2021) Lodo de esgoto da ETE como fonte de nitrogênio na cultura da margarida (*Leucanthemum maximum*). *Brazilian Journal of Development*, 7:121518-121529.

Lämmle, L., Santos, C.J., Ayer, J.E.B., Barbosa, A.I.G. (2020) Interações socioambientais nas margens do rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes, RJ: considerações sobre o caso da indústria Corbion. *Revista Contexto Geográfico*, 5:133-144. <https://doi.org/10.28998/contegeo.v5i10.11290>

Lange, A., Cavalli, E., Pereira, C.S., Chapla, M.V., Freddi, O.S. (2021) Calcium:magnesium ratio and chemical characteristics of soil under crop of soy and corn. *Nativa*, 9:294-301. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i3.11526>

Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., Revilla, P., Domínguez, J. (2013) Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function. *Biology and Fertility of Soils*, 49:723-733. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0761-7>

Liao, F., Zheng, Y., Wang, X. (2025) Promoting the replacement of chemical fertilizer with organic fertilizer: the role of policy incentives and digital technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9:1527913-1. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527913>

Lopes, M.C. (2018) Doses de lodo de esgoto na produtividade e qualidade dos frutos de abacateiro 'Hass'. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Estadual Paulista – UNESP, 89p.

Loures, D.S. da, Yamashita, O.M., Carvalho, M.A.C. de, Koga, P.S., Campos, O.R., Massaroto, J.A., Arantes, K.R., Felito, R.A., Gervazio, W., Rocha, A.M. da, Cândido, A.C.F.T. (2021) Cultivo do abacaxizeiro em função do parcelamento da adubação potássica de cobertura. *Research, Society and Development*, 10:e42510716722-1. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16722>

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, SP: POTAFOS, 319p.

Marchuk, S., Tait, S., Sinha, P., Harris, P., Antille, D.L., McCabe, B.K. (2023) Biosolids-derived fertilisers: a review of challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 875:162555-1.

Marciano, C.R. (1999) Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 93p.

Maroušek, J., Hašková, S., Zeman, R., Žák, J., Vaníčková, R., Maroušková, A, Váchal, J., Myšková, K. (2016) Polemics on ethical aspects in the compost business. *Science and Engineering Ethics*, 22:581-590. <https://doi.org/10.1007/s11948-015-9664-y>

Marques, L.S., Andreotti, M., Buzetti, S., Teixeira Filho, M.C.M., Garcia, C.M.P. (2013) Análise química da folha “D” de abacaxizeiro cv. Smooth Cayenne antes e após a indução floral em função de doses e parcelamentos de nitrogênio. *Bioscience Journal*, 29:41-50. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13390>. Acesso em: 22 dez. 2025.

Marschner, P. (2012) Marschner's mineral nutrition of higher plants. New York: Academic Press, 651p.

Martin, J.P. (1950) Use of acid, rose Bengal, and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Science*, 69:215-232.

Martins, A.G., Ventura, J.A. (2011) Adubação N-P-K e o desenvolvimento, produtividade e qualidade dos frutos do abacaxi 'Gold' (MD-2). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1367-1376. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400031>

Medeiros, J.C., Albuquerque, J.A., Mafra, Á.L., Dalla Rosa, J., Gatiboni, L.C. (2008) Relação cálcio/magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. *Semina: Ciências Agrárias*, 29:799-806.

Medeiros, M.B. de, Lopes, J.S. (2006) Biofertilizantes líquidos e sustentabilidade agrícola. *Bahia Agrícola*, 7:24-26.

Mendes, L.W., Tsai, S.M., Navarrete, A.A., Hollander, M. de, Veen, J.A. van, Kuramae, E.E. (2015) Soil-borne microbiome: linking diversity to function. *Microbial Ecology*, 70:255-265. <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0559-2>

Mendes, W.D.C., Alves, J., Cunha, P.C.D., Silva, A.R.D., Evangelista, A.W., Casaroli, D. (2016) Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20:972-977.

Miyazawa, M., Pavan, M.A., Muraoka, T., Carmo, C.A.F.S., Melo, W.J. (2009) Análise química de tecido vegetal. In: Silva, F.C. da (ed.) *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.191-233.

Mohd Ali, M., Hashim, N., Abd Aziz, S., Lasekan, O. (2022) Shelf-life prediction and kinetics of quality changes in pineapple (*Ananas comosus*) varieties at different storage temperatures. *Horticulturae*, 8:992-1. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8110992>

Moraes, L.C., Ferreira, E.G.G., Vallone, H.S., Silva, A.C.M.M. (2014) Torta de filtro de usina canavieira no desenvolvimento inicial de cafeeiros – efeitos no solo. *Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*, 40, Serra Negra. Brasília, DF: Embrapa Café, 1p.

Moreira, A., Carvalho, J.G. de, Evangelista, A.R. (1999) Influência da relação cálcio:magnésio do corretivo na nodulação, produção e composição mineral da alfafa.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, 34:249-255. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200014>

Mota, M.F.C., Pegoraro, R.F., Maia, V.M., Sampaio, R.A., Kondo, M.K., Santos, S.R. (2021) Can sewage sludge increase soil fertility and replace inorganic fertilizers for pineapple production? Research, Society and Development, 10:e50101119310-1. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19310>

Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G., Renella, G. (2017) Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science, 68:12-26. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12398

Neri, J.C., Meléndez Mori, J.B., Vilca Valqui, N.C., Huaman Huaman, E., Collazos Silva, R., Oliva, M. (2021) Effect of planting density on the agronomic performance and fruit quality of three pineapple cultivars (*Ananas comosus* (L.) Merr.). International Journal of Agronomy, 2021:5559564-1.

Neves, L.S. das, Ernani, P.R., Simonete, M.A. (2009) Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:25-32. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100003>

Nkolisa, Z., Mpambani, B., Mtamzeli-Cekiso, N., Ncama, K. (2025) Economic viability of organic fertilizers to improve growth, yield, and quality of pineapples in Africa: a review. Horticulturae, 11:636-1.

Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. (eds.) (2007) Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p.

Oliveira, A., Gomes, M., Pereira, M.E.C., Natale, W., Nunes, W.S., Ledo, C.A.S. (2015a) Qualidade do abacaxizeiro 'BRS Imperial' em função de doses de NK. Revista Brasileira de Fruticultura, 37:497-506.

Oliveira, A.M.G., Natale, W., Rosa, R.C.C., Junghans, D.T. (2015b) NK fertilization in 'BRS Imperial' pineapple – II – variables of plant production. Revista Brasileira de Fruticultura, 37:764-773. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-024/14>

Oliveira, R.S., Rios, A.D.F., Oliveira, M.H.R., Silva, R.M., Ventura, M.V.A., Trindade, K.L., Francalino, P.B. (2019) Filter pie in the control of the nematoid of root lesions in the soybean and corn. *Journal of Agricultural Science*, 11.

Omotoso, S.O., Akinrinde, E.A. (2013) Effect of nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality parameters in pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) at Ado-Ekiti, Nigeria. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 3:11-16.

Paganini, E.A.L., Silva, R.B., Ribeiro Roder, L., Guerrini, I.A., Capra, G.F., Grilli, E., Ganga, A. (2024) A systematic review and meta-analysis of the sustainable impact of sewage sludge application on soil organic matter and nutrient content. *Sustainability*, 16:9865-1. <https://doi.org/10.3390/su16229865>

Pereira, A.C.C., Mazur, N., Amaral Sobrinho, N.M.B., Oliveira, C. (2004) Uso de produtos industriais na inertização de cádmio presente em resíduo contaminado. *Agronomia*, 38:98-104.

Peters, J.B. (2005) Wisconsin procedures for soil testing, plant analysis and feed and forage analysis: plant analysis. Madison: University of Wisconsin Extension. 304p. Disponível em: <https://datcp.wi.gov/Documents/NMProcedures.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

Poorter, H., Bühler, J., van Dusschoten, D., Climent, J., Postma, J.A. (2012) Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology*, 39:839-850.

Prado, R.M., Caione, G., Campos, C.N.S. (2013) Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013:581984-1.

Pralon, A.Z., Martins, M.A. (2001) Utilização do resíduo industrial Ferkal na produção de mudas de *Mimosa caesalpiniaefolia* em estéril de extração de argila, inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares e rizóbio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:55-63.

- Priya, P., Aneesh, B., Harikrishnan, K. (2021) Genomics as a potential tool to unravel the rhizosphere microbiome interactions on plant health. *Journal of Microbiological Methods*, 185:106215-1.
- Qu, S., Li, H., Zhang, X., Gao, J., Ma, R., Ma, L., Ma, J. (2023) Effects of magnesium imbalance on root growth and nutrient absorption in different genotypes of vegetable crops. *Plants*, 12:3518-1.
- Quintana, N.R.G., Carmo, M.S., Melo, W.J. (2011) Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. *Nucleus*, 8:183-191.
- Ramos, M.J.M., Monnerat, P.H., Pinho, L.G. da R., Carvalho, A.J.C., Silva, J.A. (2009) Características morfológicas de frutos de abacaxi 'Imperial' sob deficiência de macronutrientes e boro. *Acta Horticulturae*, 822:147-154.
- Ramos, M.J.M., Monnerat, P.H., Pinho, L.G. da R., Silva, J.A. da (2011) Deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro 'Imperial': composição mineral. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33:261-271. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000032>
- Ramos, M.J.M., Monnerat, P.H., Pinho, L.G. da R., Carvalho, A.J.C. (2010) Qualidade sensorial dos frutos do abacaxizeiro 'Imperial' cultivado em deficiência de macronutrientes e de boro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32:692-699.
- Reinhardt, D.H., Cabral, J.R.S., Souza, L.F. da S., Sanches, N.F., Matos, A.P. (2002) Les cultivars 'Pérola' et 'Cayenne lisse' dans l'état de Bahia au Brésil: croissance, floraison, parasites, maladies, rendement et qualité du fruit. *Fruits*, 57:43-53. <https://doi.org/10.1051/fruits:2002005>
- Rengel, Z. (2015) Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15:397-409.
- Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S. (2017) Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 40:928-946. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>

Rios, E.S.C., Mendonça, R.M.N., Fernandes, L.F., Figueredo, L.F. (2018) Growth of leaf D and productivity of 'Imperial' pineapple as a function of nitrogen and potassium fertilization. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 13:1-9.

Rodrigues, A.A., Mendonça, R.M.N., Silva, A.P. da, Silva, S.M. (2013) Nutrição mineral e produção de abacaxizeiro 'Pérola' em função das relações K/N na adubação. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35:625-633.

Rodrigues, J.D. (2023) Fertilizantes minerais no cultivo do milho. Dissertação de Mestrado em Biotecnologia Vegetal – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 82p.

Ronquim, C.C. (2010) Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite. 26p.

Salomon, K.R., Silva Lora, E.E. (2009) Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33:1101-1107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>

Santos, D.H., Silva, M.A., Tiritan, C.S., Foloni, J.S.S., Echer, F.R. (2010) Qualidade e produtividade da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 40:454-461.

Siebeneichler, S.C., Monnerat, P.H., Carvalho, A.J.C., Silva, J.A. (2002) Composição mineral da folha em abacaxizeiro: efeito da parte da folha analisada. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 24:194-198.

Silva, J.H.B. da, Nascimento, M.A. do, Silva, A.V. da, Neto, F.P., Araújo, J.R.E.S., Silva, J.M. da, Silva, A.J. da, Mielezrski, F. (2021) Brotação inicial, teor de sólidos solúveis e índice de maturação da cana-de-açúcar submetida à adubação com torta de filtro enriquecida. *Brazilian Journal of Development*, 7:32575-32592. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-805>

Silva, L.G., Camargo, R. de, Lana, R.M.Q., Delvaux, J.C., Fagan, E.B., Machado, V.J. (2020) Biochemical changes and development of soybean with use of pelletized organomineral fertilizer containing sewage sludge and filter cake. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 42:e44249-1. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.44249>

Silva, M.L. de S., Trevizam, A.R. (2015) Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. Piracicaba, SP: IPNI, p. 8-18.

Silva, R.D.S., Teixeira Filho, M.C.M., Jalal, A., Alves, R.S., Elias, N.C., Nascimento, R.E.N., Nogueira, T.A.R. (2024) Treating tropical soils with composted sewage sludge reduces the mineral fertilizer requirements in sugarcane production. *Land*, 13:1820-1.

Silva, S.D.O., Mafra, A.K.C., Pelissari, F.M., Lemos, L.R., Molina, G. (2025) Biotechnology in agro-industry: valorization of agricultural wastes, by-products and sustainable practices. *Microorganisms*, 13:1789-1.

Siqueira, D.P., Barroso, D.G., Marciano, C.R. (2017) Lodo de esgoto: diretrizes e o seu uso como fertilizante, condicionador de solo e substrato florestal. *Vértices*, 19:171-186.

Sobral, L.F., Barreto, M.C. de V., Silva, A.J. da, Anjos, J.L. dos (2015) Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 13p.

Souza Júnior, I.T. de, Jardini, D.C., Bezerra, C.E., Nunes, G.N. (2024) Prospecção de bactérias solubilizadoras de fósforo, promotoras de crescimento de plantas de soja e biocontroladoras do fungo *Sclerotinia sclerotiorum*. *Connection Line – Revista Eletrônica do UNIVAG*, 31:e2542-1.
<https://doi.org/10.18312/connectionline.v31i31.2542>

Souza, L.F. da S., Oliveira, A.M.G. (2021) Calagem e adubação para o abacaxizeiro. In: Borges, A.L. (ed.) *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. 2.ed. Brasília: Embrapa, p.95-122.

Souza, L.F. da S., Reinhardt, D.H. (2007) Pineapple. In: Crisóstomo, L.A., Naumov, A., Johnston, A.E. (ed.) *Fertilizing for high yield and quality tropical fruits of Brazil*. Horgen: International Potash Institute, p.179-201.

Spironello, A., Quaggio, J.A., Teixeira, L.A.J., Furlani, P.R., Sigrist, M.M. (2004) Pineapple yield and fruit quality affected by NPK fertilization in a tropical soil. *Revista*

Brasileira de Fruticultura, 26:155-159. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452004000100041>

Sposito, G. (1989) The chemistry of soils. Oxford: Oxford University Press, 277p.

Steingass, C.B., Vollmer, K., Lux, P.E., Dell, C., Frank, J., Carle, R., Schweiggert, R.M. (2020) HPLC-DAD-APCI-MSn analysis of the genuine carotenoid pattern of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) infructescence. Food Research International, 127:108709-1. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108709>

Stevenson, F.J. (1994) Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley & Sons. 496p.

Teixeira, L.A.J., Quaggio, J.A., Cantarella, H., Mellis, E.V. (2011) Potassium fertilization for pineapple: effects on soil chemical properties and plant nutrition. Revista Brasileira de Fruticultura, 33:627-636. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000200036>

Teixeira, L.A.J., Quaggio, J.A., Zambrosi, F.C.B. (2009) Preliminary DRIS norms for 'Smooth Cayenne' pineapple and derivation of critical levels of leaf nutrient concentrations. Acta Horticulturae, 822:131-138.

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (2017) Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Brasília: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 22 dez. 2025.

Tontti, T., Poutiainen, H., Heinonen-Tanski, H. (2017) Efficiently treated sewage sludge supplemented with nitrogen and potassium is a good fertilizer for cereals. Land Degradation and Development, 28:742-751. <https://doi.org/10.1002/ldr.2528>

Wali, N. (2019) Pineapple (*Ananas comosus*). In: Nabavi, S.M., Silva, A.S. (ed.) Nonvitamin and nonmineral nutritional supplements. Amsterdam: Elsevier, p.367-373.

Weifeng, Z., Weixiu, Y., Zhiling, M., Xiaoyan, Z., Ligu, C., Shenghui, L., Yanfang, Z. (2020) Effects of time and height of shading on yield and quality of pineapple. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 512:012101-1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/512/1/012101>

Werle, R., Garcia, R.A., Rosolem, C.A. (2008) Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:2297-2305. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600009>

Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., Petersen, J. (2021) Synergistic and antagonistic interactions between magnesium and potassium in plants. *The Crop Journal*, 9:249-256.

Yüksel, O., Kavdır, Y. (2020) Improvement of soil quality parameters by municipal solid waste compost application in clay-loam soil. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8:603-609.

APÊNDICE

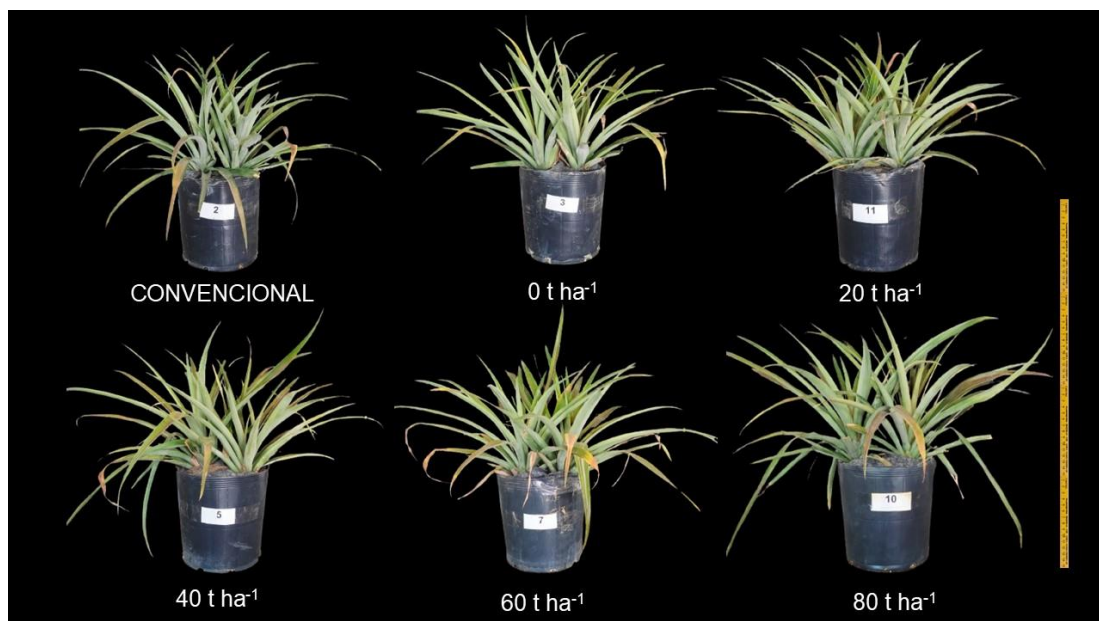


Figura 1. Plantas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' fertilizadas com torta de filtro, aos 220 dias (vista frontal).

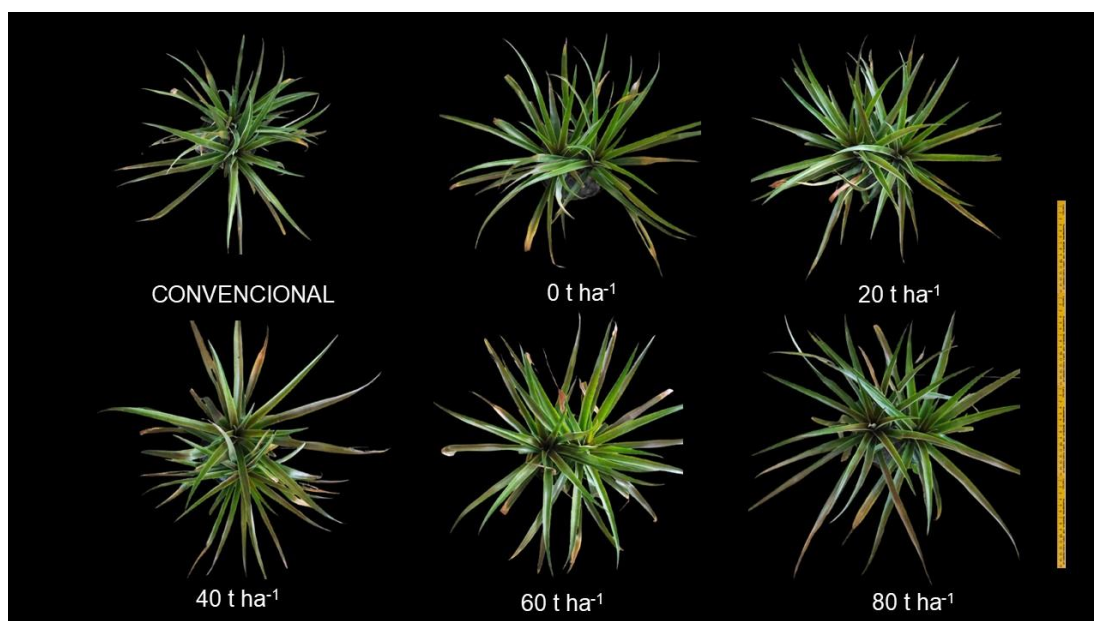


Figura 2. Plantas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' fertilizadas com doses de torta de filtro, aos 220 dias (vista aérea).

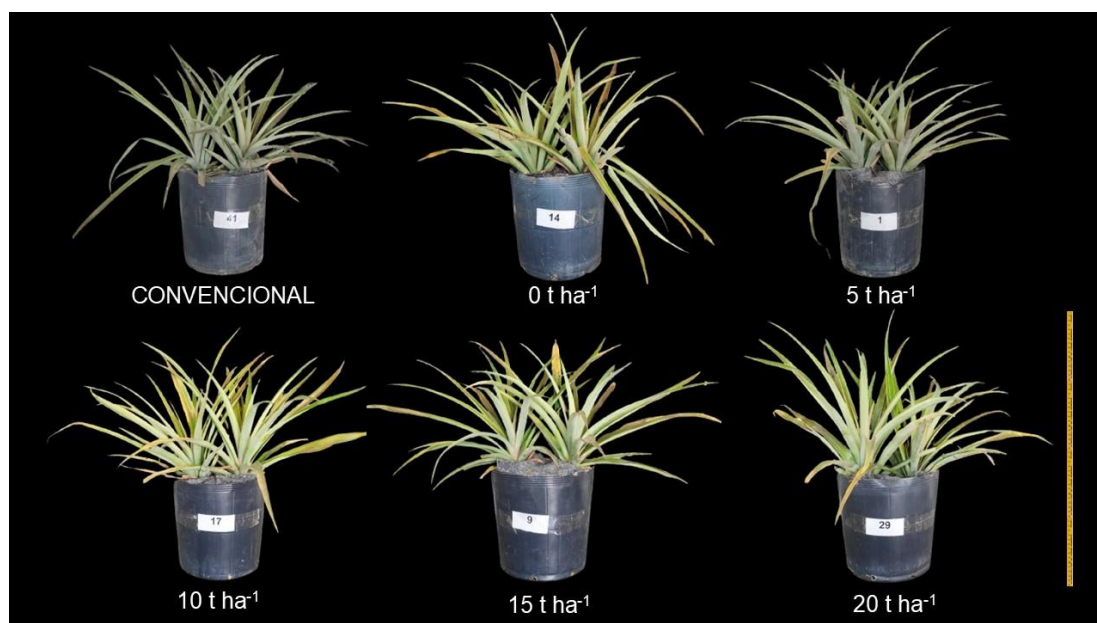


Figura 3. Plantas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' fertilizadas com doses de composto de lodo de ETE, aos 220 dias (vista frontal).

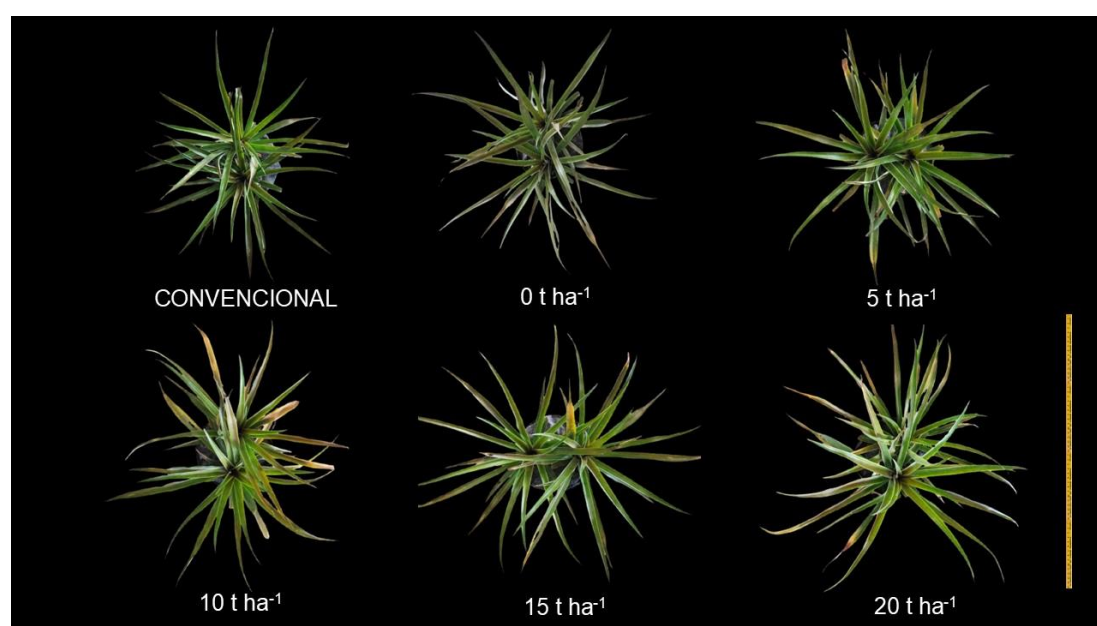


Figura 4. Plantas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' fertilizadas com doses de composto de lodo de ETE, aos 220 dias (vista aérea).

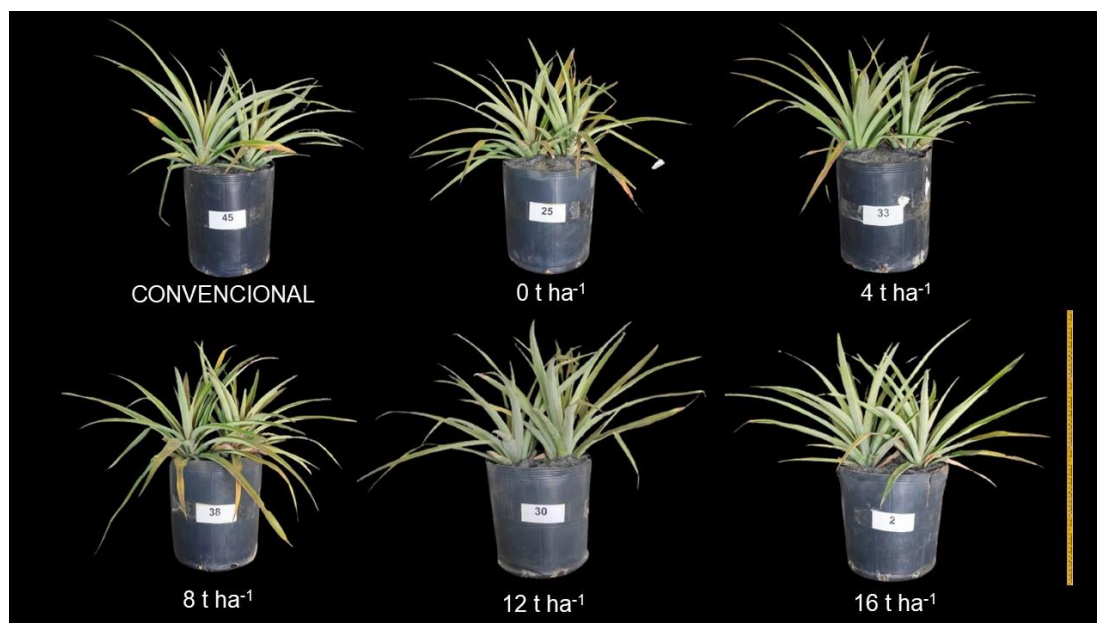


Figura 5. Plantas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' fertilizadas com doses de resíduo de ácido láctico, aos 220 dias (vista frontal).

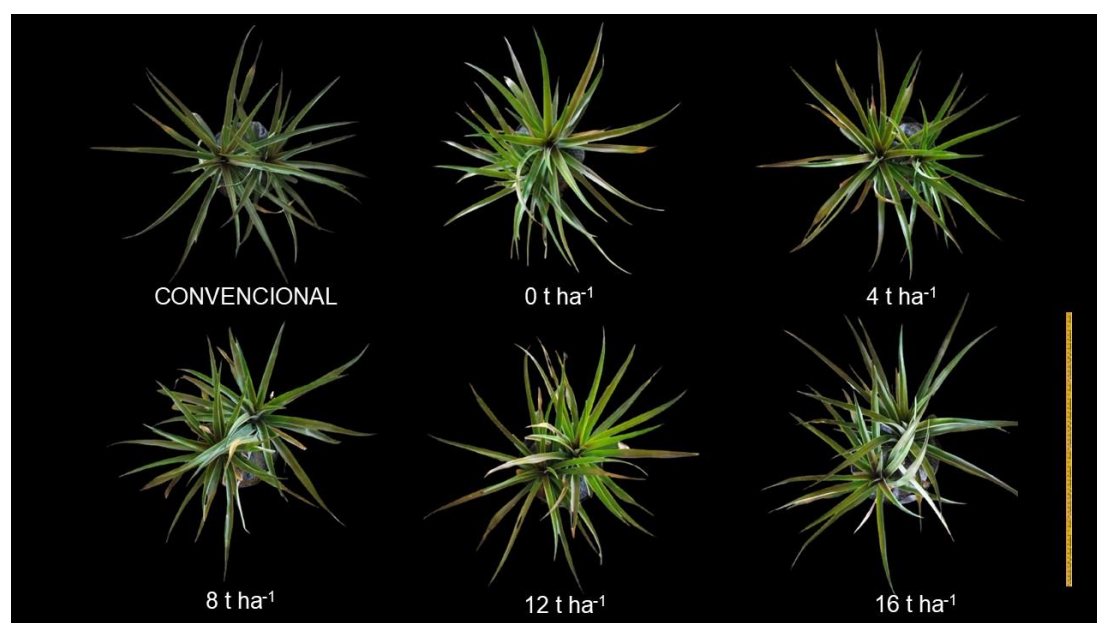


Figura 6. Plantas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' fertilizadas com doses de resíduo de ácido láctico, aos 220 dias (vista aérea).