



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE GURUPI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

WARLYTON SILVA MARTINS

**REÚSO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE TINTAS E DE ABATEDOURO DE
BOVINOS PARA FERTIRRIGAÇÃO DE CAPIM MOMBAÇA**

**Gurupi, TO
2025**

Warlyton Silva Martins

Reúso de efluentes da indústria de tintas e de abatedouro de bovinos para fertirrigação de capim Mombaça

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Doutor em Produção Vegetal.

Orientadora: Profa. Dra. Grasielle Soares Cavallini

Coorientadora: Dra. Anna Karla dos Santos Pereira

**Gurupi, TO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- S586r Silva Martins, Warlyton.
Reúso de efluentes da indústria de tintas e de abatedouro de bovinos para fertirrigação de capim Mombaça. / Warlyton Silva Martins. – Gurupi, TO, 2025.
59 f.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Gurupi - Curso de Pós-Graduação (Doutorado) em Produção Vegetal, 2025.
Orientadora : Grasielle Soares Cavallini
Coorientadora : Anna Karla dos Santos Pereira
1. Fertirrigação. 2. Forragem. 3. Sustentabilidade agrícola. 4. Resíduos industriais. I. Título

CDD 635

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

A Deus, o Dono dos meus dias, minha rocha firme e constante, minha força nos dias difíceis e meu alento nas noites silenciosas. Sem Ele, nada faria sentido. A Ele, toda a honra e toda a glória por ter conduzido meus passos até aqui.

Aos meus pais, João Neto e Maria Silva, que mesmo diante das dificuldades da vida nunca deixaram de me incentivar a sonhar mais alto. O exemplo de trabalho, honestidade e dignidade de vocês é o alicerce da minha história. Cada conquista minha é, também, de vocês.

Aos meus irmãos — Diego Maycon, Joyce Daniele, Murilo Souza e Kayo Abrenhosa — minha gratidão pelo apoio, pelas palavras, pelos silêncios compreensivos e pelas orações em meu favor. Somos feitos do mesmo chão, e é nesse chão que aprendi a resistir, a persistir e a levantar sempre que caí.

Ao meu filho, Estêvão Veríssimo, meu maior presente, minha luz, meu motivo de continuar mesmo quando o cansaço falou mais alto. É por você e para você que construo caminhos. Que sua vida seja sempre repleta de fé, coragem e possibilidades. Você é e sempre será minha maior inspiração.

À Universidade Federal do Tocantins (UFT) e à Capes, meu profundo agradecimento pela oportunidade de fazer parte dessa instituição que tanto contribuiu para minha formação pessoal, acadêmica e profissional. Sou fruto do ensino público, gratuito e de qualidade — e tenho orgulho disso.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Grasielle Soares Cavallini, meu sincero reconhecimento por toda dedicação, paciência e orientação durante essa jornada. Obrigado por acreditar no meu potencial, por me amparar nas dúvidas e por compartilhar comigo não só conhecimento, mas humanidade.

E a todos aqueles que torceram por mim, mesmo de longe, mesmo em silêncio, minha eterna gratidão. Cada palavra de incentivo, cada gesto de carinho, cada oração foi combustível em minha caminhada.

Eu vim de onde muitos desacreditam, de onde as oportunidades são escassas e os desafios imensos. Mas cheguei aqui, no doutorado. E se hoje posso escrever essas palavras com o coração em festa, é porque muitos caminharam comigo. Esse título não é só meu. É nosso.

Com gratidão e emoção, muito obrigado. Deus é bom!

“Pois dele, por ele e para ele são todas as coisas. A ele seja a glória para sempre! Amém”.

Romanos 11:36

RESUMO

A crescente demanda por alternativas sustentáveis para o uso da água na agricultura impulsiona o interesse pelo reúso de efluentes industriais e agroindustriais, especialmente em regiões com escassez hídrica e elevado custo para tratamento convencional. Neste contexto, o presente trabalho investigou o reúso agrícola de efluentes provenientes da indústria de abate de bovinos e da indústria de tintas, com foco na fertirrigação do capim Mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), uma forrageira tropical de elevado potencial produtivo. Os resultados foram divididos em dois capítulos experimentais: “Produtividade e composição químico-bromatológica do capim Mombaça fertirrigado com efluente de abatedouro bovino com e sem desinfecção com ácido peracético”, neste capítulo abordou-se o desempenho agrônomo da forrageira submetida à aplicação dos efluentes de abatedouro bovino, com foco nos efeitos da desinfecção por ácido peracético sobre a produtividade da biomassa, bem como sobre a composição bromatológica (teores de proteína bruta, fibra, lignina, entre outros) e o acúmulo de nutrientes nos tecidos vegetais. A avaliação também considerou a viabilidade do uso do capim para fins forrageiros, relacionando aspectos de qualidade e segurança. Já no capítulo “Atributos químicos do solo e produtividade do capim Mombaça fertirrigado com efluentes da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reúso agrícola”, foram investigadas as alterações nos atributos químicos do solo em função da aplicação combinada dos dois tipos de efluente na proporção 1:1. Foram avaliadas variáveis como pH, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica (CTC), teores de macro e micronutrientes, além da saturação por bases e por alumínio. A presença de carbonatos no efluente de tintas foi objeto de atenção especial, sendo correlacionada aos efeitos sobre o pH e à dinâmica de disponibilidade de nutrientes no solo. De modo geral, os resultados obtidos nos dois capítulos oferecem evidências sólidas da viabilidade técnica e agrônoma do reúso de efluentes industriais e agroindustriais na agricultura, promovendo o uso racional da água e o aproveitamento de nutrientes residuais. O estudo destaca-se por integrar ciência do solo, fisiologia vegetal, bromatologia e aspectos ambientais, fornecendo subsídios importantes para o desenvolvimento de sistemas de produção mais resilientes e eficientes no uso de recursos.

Palavras-chaves: Fertirrigação. Forragem. Sustentabilidade agrícola. Resíduos industriais. Qualidade do solo.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable water use alternatives in agriculture has increased interest in the reuse of industrial and agro-industrial effluents, especially in regions facing water scarcity and high costs for conventional treatment. In this context, the present study investigated the agricultural reuse of effluents from the bovine slaughter industry and the paint industry, focusing on the fertigation of Mombaça grass (*Panicum maximum* cv. Mombaça), a tropical forage species with high productive potential. The results are presented in two experimental chapters. The first, "Productivity and chemical-bromatological composition of Mombaça grass fertigated with bovine slaughterhouse effluent with and without disinfection using peracetic acid," analyzed the agronomic performance of the grass under the application of slaughterhouse effluent, emphasizing the effects of peracetic acid disinfection on biomass yield, bromatological quality (crude protein, fiber, lignin, among others), and nutrient accumulation in plant tissues. Forage quality and safety aspects were also considered. The second chapter, "Chemical attributes of soil cultivated with Mombaça grass fertigated with combined effluents from the paint and bovine slaughter industries for agricultural reuse," explored soil chemical changes resulting from the combined application of both effluents at a 1:1 ratio. Variables such as pH, electrical conductivity, cation exchange capacity (CEC), macro- and micronutrient levels, and base and aluminum saturation were evaluated. Special attention was given to the presence of carbonates in paint effluent, due to their influence on soil pH and nutrient availability. Overall, the findings provide strong evidence of the technical and agronomic feasibility of reusing industrial effluents in agriculture, contributing to more efficient water use and nutrient recycling. The study integrates soil science, plant physiology, forage quality, and environmental considerations, supporting the development of more resilient and resource-efficient production systems.

Keywords: Fertigation. Forage. Agricultural sustainability. Industrial waste. Soil quality

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	10
1 INTRODUÇÃO GERAL	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Características dos efluentes da indústria de tinta e de abate de bovinos.....	13
2.2 O Ácido peracético na agricultura	14
REFERÊNCIAS.....	19
CAPÍTULO II.....	24
Produtividade e composição químico-bromatológica do capim Mombaça fertirrigado com efluente de abatedouro bovino com e sem desinfecção com ácido peracético.....	24
1 INTRODUÇÃO	24
2 MATERIAL E MÉTODOS	25
2.1 Solo utilizado para o estudo	25
2.2 Efluente de abate de bovino utilizado para fertirrigação	26
2.3 Preparação das amostras de capim-Mombaça	27
2.3.1 Plantio.....	27
2.3.2 Fertirrigação.....	28
2.3.3 Avaliação das propriedades químico-bromatológicas	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4 CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIAS.....	37
CAPÍTULO III	41
Atributos químicos do solo e produtividade do capim Mombaça fertirrigado com efluentes da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reuso agrícola	41
1 INTRODUÇÃO	41
2 MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1 Solo utilizado para o estudo.....	42
2.2 Efluente da indústria de tinta e de abate de bovino utilizado para fertirrigação...43	43
2.3 Preparação das amostras de capim-Mombaça	44
2.3.1 Plantio.....	44
2.3.2 Fertirrigação.....	44
2.3.3 Produtividade do capim Mombaça.....	45
2.3.4 Avaliação das propriedades químicas do solo.....	45
3 RESULTADOS	45
3.1 Produtividade do capim Mombaça	45
3.2 Extração de nutrientes pelo capim Mombaça.....	47

3.3 Propriedades químicas do solo	49
4 CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	55

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO GERAL

O agravamento da escassez hídrica em diversas regiões do mundo, intensificado pelas mudanças climáticas, pelo crescimento populacional e pela pressão sobre os recursos naturais, tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o uso racional da água, especialmente na agricultura irrigada. Nesse cenário, o reúso de efluentes tratados surge como estratégia promissora, permitindo o aproveitamento de nutrientes presentes nos efluentes e reduzindo a demanda por fertilizantes minerais e água potável (Medeiros et al., 2020; Pedrero et al., 2022).

A fertirrigação com efluentes não convencionais, especialmente de origem industrial, exige um rigoroso controle de qualidade sanitária, química e microbiológica, de modo a garantir a segurança dos sistemas produtivos, do meio ambiente e da saúde pública. Efluentes industriais, como os da indústria de tintas, contêm compostos recalcitrantes, pigmentos, metais e solventes, enquanto os efluentes de abatedouros bovinos são caracterizados por elevada carga orgânica, nitrogênio, fósforo e microrganismos patogênicos (Almeida et al., 2023; Dutra et al., 2020). A combinação controlada desses efluentes pode potencializar o valor agrônomico do insumo final, desde que submetidos a tratamentos adequados e a processos eficazes de desinfecção.

Entre os desinfetantes disponíveis, o ácido peracético (APA) tem ganhado destaque como alternativa ambientalmente segura e tecnicamente viável para o condicionamento sanitário de efluentes. O APA apresenta elevada eficiência contra bactérias, vírus e fungos, atuando por oxidação dos componentes celulares, além de não formar subprodutos tóxicos ou carcinogênicos, como ocorre com o cloro (Pereira et al., 2021; Rezende et al., 2022). Após sua ação, o APA decompõe-se rapidamente em ácido acético, água e oxigênio, o que reduz os riscos de toxicidade residual ao solo e aos cultivos (Ferreira et al., 2019).

A aplicação do APA tem sido avaliada com êxito em efluentes sanitários e de origem agroindustrial, demonstrando-se eficaz na redução de coliformes termotolerantes, *Escherichia coli*, ovos de helmintos e outros indicadores microbiológicos relevantes (Alves et al., 2021; Bastos et al., 2023). No entanto, seu uso em sistemas de reúso agrícola com efluentes industriais combinados ainda é pouco explorado, o que reforça a necessidade de pesquisas que integrem parâmetros de biossegurança com impactos agrônomicos e ambientais.

Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o reúso combinado de efluentes da indústria de tinta e de abate de bovinos, com e sem desinfecção por ácido APA, para fins de

fertirrigação, considerando os efeitos físico-químicos, microbiológicos e sobre a produtividade agrícola. A proposta visa contribuir para a ampliação do conhecimento técnico-científico na área de reuso agrícola de águas residuárias, com foco na sustentabilidade, biossegurança e eficiência do uso dos recursos hídricos e nutricionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O reúso de efluentes na agricultura representa uma estratégia fundamental para o enfrentamento de desafios relacionados à escassez hídrica, segurança alimentar e sustentabilidade ambiental. Essa prática tem ganhado destaque nas últimas décadas, especialmente em regiões áridas e semiáridas, onde a disponibilidade de água para irrigação é limitada. A integração de efluentes tratados nos sistemas agrícolas contribui para a conservação dos recursos hídricos naturais, redução da poluição hídrica e aumento da resiliência agrícola frente às mudanças climáticas (Pedrero et al., 2020).

A intensificação da agricultura mundial e a pressão sobre os recursos hídricos tornaram o reúso de efluentes uma alternativa viável, não apenas como fonte de água, mas também como suplemento de nutrientes essenciais às culturas. Estudos demonstram que os efluentes, quando devidamente tratados, podem fornecer nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e promovendo a fertilidade do solo (Qadir et al., 2020). Essa dupla função dos efluentes – como fonte hídrica e nutricional – reforça seu potencial agrônomo, desde que manejado com critérios técnicos rigorosos.

Do ponto de vista legal e institucional, diversos países têm implementado diretrizes e normas específicas para garantir a segurança do reúso agrícola de efluentes. A Organização Mundial da Saúde (OMS), a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e a União Europeia estabeleceram parâmetros de qualidade e orientações para minimizar riscos sanitários e ambientais. No entanto, a adoção efetiva dessas práticas ainda enfrenta barreiras tecnológicas, econômicas e socioculturais, exigindo maior investimento em pesquisa, capacitação técnica e políticas públicas integradas (WHO, 2020).

A evolução tecnológica no tratamento de águas residuárias industriais e domésticas tem ampliado as possibilidades de reúso agrícola. Sistemas de tratamento avançado, como os reatores biológicos, processos de membranas e desinfecção química com agentes como o APA, têm aumentado a qualidade dos efluentes e sua adequação para a irrigação de culturas alimentares e não alimentares. Esse avanço tecnológico é essencial para garantir a biosegurança e a sustentabilidade da prática (Zarzo et al., 2021).

No entanto, é crucial reconhecer as especificidades dos diferentes tipos de efluentes, cujas características físico-químicas e microbiológicas variam amplamente em função da origem. Efluentes industriais, como os provenientes da indústria de tintas e do abate de bovinos, apresentam complexidades distintas que demandam abordagens de tratamento e monitoramento diferenciadas. A presença de compostos orgânicos recalcitrantes, metais pesados ou elevada

carga orgânica exige avaliação criteriosa quanto à viabilidade do reúso em ambientes agrícolas (Kiziloglu et al., 2021).

Além disso, o uso agrícola de efluentes deve considerar fatores como tipo de cultura, método de irrigação, tipo de solo e clima local. Culturas consumidas cruas, por exemplo, demandam padrões de qualidade mais restritivos do que aquelas destinadas à produção de fibras ou energia. A fertirrigação por gotejamento oferece vantagens adicionais em termos de segurança, ao minimizar o contato direto com partes comestíveis das plantas (Hamilton et al., 2019).

Nesse cenário, a pesquisa científica desempenha papel central na validação de modelos de reúso que conciliem segurança, eficiência agrônômica e viabilidade econômica. A geração de dados empíricos sobre o desempenho agrônômico, ambiental e sanitário do uso de efluentes na irrigação é fundamental para subsidiar decisões técnicas e regulatórias. O presente trabalho insere-se nesse contexto, ao investigar o potencial do reúso combinado de efluentes da indústria de tinta e de abate de bovinos, com e sem desinfecção com APA, para fins de fertirrigação.

2.1 Características dos efluentes da indústria de tinta e de abate de bovinos

A composição dos efluentes industriais varia significativamente conforme o setor produtivo, influenciando diretamente as estratégias de tratamento e seu potencial de reúso agrícola. No caso da indústria de tinta e do setor de abate de bovinos, os efluentes apresentam características contrastantes que impõem desafios específicos à gestão ambiental e ao reúso seguro na agricultura.

Os efluentes gerados pela indústria de tintas são ricos em compostos orgânicos voláteis (COVs), solventes aromáticos, pigmentos sintéticos, resinas e metais, como cádmio, chumbo e cromo (Wu et al., 2020). Esses compostos apresentam baixa biodegradabilidade e podem exercer efeitos tóxicos significativos sobre os organismos do solo e da água, caso não sejam adequadamente tratados. A elevada carga química desses efluentes exige tratamentos físico-químicos combinados, como coagulação-floculação, adsorção em carvão ativado e processos avançados de oxidação (Sharma et al., 2021).

Do ponto de vista agrônômico, o uso direto de efluentes de tintas na fertirrigação é inviável sem tratamentos que removam completamente substâncias tóxicas e persistentes. No entanto, estudos recentes indicam que, após processos rigorosos de purificação, é possível reduzir significativamente a concentração de compostos recalcitrantes, tornando o reúso uma possibilidade em áreas agrícolas não alimentares ou para recuperação de áreas degradadas (Li et al., 2021).

Os efluentes oriundos do abate de bovinos apresentam características distintas, com elevada carga orgânica e presença de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, além de sólidos suspensos, gorduras, sangue e resíduos de produtos químicos utilizados na higienização (Silva et al., 2020). Em geral, esses efluentes possuem maior potencial agronômico, desde que submetidos a tratamento biológico adequado e desinfecção final.

A digestão anaeróbia tem sido amplamente utilizada no tratamento primário de efluentes de frigoríficos, contribuindo para a redução da demanda química de oxigênio (DQO) e da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além da geração de biogás como subproduto energético (Couto et al., 2022). Após o tratamento, esses efluentes podem ser incorporados à agricultura como fonte de água e nutrientes, especialmente em sistemas de fertirrigação localizada.

A hipótese do reúso combinado dos efluentes da indústria de tinta e de abate de bovinos baseia-se na complementaridade de suas características. Enquanto o efluente da indústria de tintas apresenta elevada concentração de carbonato, o efluente de abate apresenta alta carga orgânica e nutrientes. O uso combinado pode permitir diluição dos contaminantes industriais e melhor aproveitamento do potencial agronômico dos resíduos orgânicos (Pereira et al., 2023).

Contudo, essa prática requer cuidadosa caracterização físico-química e microbiológica, além da aplicação de processos de desinfecção robustos, como o uso do APA, para garantir a segurança do solo, das culturas e dos consumidores finais. Ensaios de compatibilidade, toxicidade e desempenho agronômico devem preceder qualquer aplicação prática.

A aplicação de técnicas de desinfecção no tratamento de efluentes destinados à irrigação agrícola é um dos principais pilares para garantir a segurança microbiológica do reúso, especialmente em culturas alimentares. A desinfecção visa a eliminação ou inativação de microrganismos patogênicos que possam comprometer a saúde humana, animal e ambiental. Dentre os diversos agentes desinfetantes utilizados, o APA tem se destacado como uma alternativa promissora devido à sua eficácia, perfil ambientalmente favorável e ausência de subprodutos halogenados (Gehr et al., 2021).

2.2 O Ácido peracético na agricultura

O APA ($\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$) é um agente oxidante orgânico obtido a partir da reação entre o ácido acético e o peróxido de hidrogênio. Trata-se de um composto altamente reativo, com forte poder germicida contra bactérias, vírus, fungos e protozoários. Sua ação ocorre por meio da

oxidação de estruturas celulares essenciais dos microrganismos, como proteínas, lipídios de membrana e material genético, levando à morte celular (Liberti & Notarnicola, 2021).

Uma das principais vantagens do APA em comparação com outros desinfetantes, como o cloro, é a sua decomposição em subprodutos não tóxicos – ácido acético, oxigênio e água. Isso evita a formação de compostos organoclorados potencialmente carcinogênicos e a bioacumulação no ambiente, tornando-o uma opção mais segura e ecologicamente compatível para o reúso agrícola (Zahmatkesh et al., 2023).

Inicialmente utilizado em ambientes hospitalares e na indústria alimentícia, o APA vem sendo amplamente empregado no tratamento de águas residuárias e efluentes industriais, especialmente em estações de tratamento de esgoto (ETE) e unidades de processamento de alimentos. Seu uso se expandiu para sistemas de reúso agrícola, onde atua como desinfetante final após os processos primários e secundários de tratamento (Śmiechowicz et al., 2022).

A eficiência do APA na inativação de microrganismos em ambientes com carga orgânica elevada é superior à de outros desinfetantes como o cloro. Estudos conduzidos por Ramos-Payán et al. (2024) indicam que o APA mantém desempenho biocida estável mesmo na presença de sólidos suspensos, enquanto a eficácia do ozônio pode ser comprometida devido à rápida decomposição em contato com matéria orgânica, exigindo doses significativamente maiores para alcançar o mesmo nível de desinfecção.

Do ponto de vista operacional, o APA apresenta vantagens relacionadas ao manuseio e armazenamento. Por ser um líquido estável em concentrações comerciais, seu transporte e aplicação podem ser realizados com maior segurança e flexibilidade. Diferente de outros desinfetantes, a exemplo do ozônio que precisa ser gerado no local de aplicação, utilizando geradores de alto custo energético e com riscos associados à inalação e explosividade em altas concentrações (Gabrielli et al., 2023).

Alguns trabalhos mostram que o APA apresenta boa compatibilidade com sistemas biológicos de tratamento de efluentes, não inibindo de forma significativa a atividade de microrganismos nitrificantes e desnitrificantes, o que é um diferencial importante em comparação com desinfetantes como o hipoclorito de sódio (Han et al., 2023). Tal propriedade amplia o potencial do APA para uso em processos de reúso de água para fins agrícolas e industriais, onde a sustentabilidade dos processos microbiológicos deve ser preservada.

Do ponto de vista econômico, embora o custo direto do APA possa ser superior ao de desinfetantes convencionais, sua eficácia em menores concentrações, aliado à ausência de necessidade de neutralização e à segurança no manuseio, contribui para a redução de custos

operacionais indiretos. Além disso, seu uso contribui com metas ambientais e regulatórias que restringem o uso de desinfetantes geradores de subprodutos tóxicos (Yang et al., 2023).

Estudos indicam que o APA mantém sua eficácia em ampla faixa de pH e temperatura, o que o torna adequado para diversas condições operacionais. Além disso, seu tempo de contato necessário para a desinfecção efetiva é relativamente curto, o que favorece sua aplicação em unidades de tratamento com alta vazão (Gehr et al., 2021). No entanto, apesar dessas vantagens, a presença de resíduos residuais de APA nos efluentes tratados levanta preocupações quanto à sua segurança agrônômica e ecológica, principalmente quando o efluente é aplicado diretamente no solo por meio de sistemas de fertirrigação (Guo et al., 2022).

Agronomicamente, um dos principais desafios associados ao uso do APA em efluentes para irrigação agrícola está relacionado à sua reatividade residual no solo. Estudos indicam que concentrações remanescentes de APA, mesmo em níveis considerados baixos, podem interferir na microbiota do solo, afetando negativamente os microrganismos responsáveis por processos biogeoquímicos essenciais, como a fixação de nitrogênio e a decomposição da matéria orgânica (Zhao et al., 2023). Tais alterações comprometem a fertilidade do solo e, conseqüentemente, a produtividade agrícola.

Além disso, o impacto residual do APA em culturas vegetais ainda é pouco compreendido. Algumas investigações preliminares sugerem que resíduos de APA aplicados via irrigação podem causar estresse oxidativo em plantas sensíveis, afetando processos fisiológicos como fotossíntese e absorção de nutrientes (Feng et al., 2022). Esse efeito é exacerbado quando o efluente apresenta flutuações na concentração de APA, resultado da degradação incompleta ou da aplicação não homogênea no campo.

Outro ponto crítico refere-se à variação da eficácia do APA em diferentes tipos de efluentes. Enquanto sua ação é bem documentada em águas de reúso com baixo teor de sólidos, efluentes oriundos da indústria agroalimentar ou de abatedouros, com elevada carga orgânica, podem reduzir significativamente a eficiência do APA, exigindo doses maiores para alcançar a desinfecção desejada. Essa elevação na dosagem, por sua vez, aumenta o risco de resíduos tóxicos no ambiente agrícola (Ramos-Payán et al., 2024).

A compatibilidade do APA com sistemas de irrigação pressurizados também impõe limitações práticas. Sua natureza corrosiva pode degradar componentes metálicos e polímeros convencionais, exigindo o uso de materiais resistentes à oxidação, o que eleva os custos operacionais e de manutenção das infraestruturas agrícolas (Lizotte et al., 2023). Além disso, o transporte e armazenamento do APA em propriedades rurais requerem protocolos rigorosos de

segurança, o que dificulta sua adoção em pequenas propriedades ou regiões com baixa assistência técnica.

Do ponto de vista regulatório, a ausência de normas específicas que estabeleçam limites seguros de resíduos de APA no solo ou em produtos agrícolas dificulta a adoção em larga escala dessa tecnologia. Enquanto países como os Estados Unidos e membros da União Europeia regulam o uso do APA em desinfecção de alimentos e água potável, ainda são escassas as diretrizes técnicas voltadas à sua aplicação agrícola com foco em reúso de efluentes (Yang et al., 2023). Essa lacuna normativa gera incertezas para produtores e técnicos agrícolas quanto à segurança do uso continuado do APA.

A degradação incompleta do APA em condições específicas de temperatura, pH e presença de matéria orgânica representa outro obstáculo relevante. Em ambientes agrícolas, onde essas variáveis são altamente dinâmicas, o controle preciso da decomposição do APA torna-se complexo. Subprodutos intermediários podem persistir no ambiente por períodos mais longos do que o previsto, gerando impactos cumulativos ainda não totalmente compreendidos (Chen et al., 2023).

Portanto, embora o uso do APA em efluentes para fins de irrigação agrícola represente uma alternativa promissora em termos de desinfecção e sustentabilidade, é necessário cautela. A compreensão aprofundada dos resíduos gerados, suas interações com o solo e plantas, além do estabelecimento de normas técnicas específicas, são essenciais para garantir a segurança agrônômica e ambiental do processo. O avanço da pesquisa aplicada e o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento em campo são fundamentais para superar essas limitações e ampliar o uso responsável do APA na agricultura.

Nessa perspectiva, alguns trabalhos serão descritos para demonstrar as diversas pesquisas nesta temática, a maioria demonstrando a eficácia do APA como agente desinfetante em efluentes voltados ao reúso agrícola. Por exemplo, Munir et al. (2021) investigaram o uso do APA em efluentes secundários urbanos, observando elevada redução de *Escherichia coli* e vírus entéricos com doses entre 1 a 5 mg·L⁻¹ e tempos de contato inferiores a 15 minutos. Resultados semelhantes foram obtidos por Świechowski et al. (2022), que aplicaram o APA em efluentes de frigoríficos, alcançando níveis de inativação bacteriana compatíveis com os padrões internacionais de reúso.

Outro estudo conduzido por Zhou et al. (2020) avaliou o desempenho do APA em comparação com o hipoclorito de sódio e o ozônio. Os autores concluíram que, embora o ozônio apresente maior eficiência oxidativa, o APA se mostrou mais estável, econômico e de fácil manuseio em escala real, além de não gerar subprodutos clorados.

Além da eficiência microbiológica, o APA também tem sido estudado quanto à sua influência em parâmetros físico-químicos dos efluentes. De acordo com Perez et al. (2022), o uso do APA não altera significativamente a condutividade elétrica ou a concentração de nutrientes, preservando o valor agrônômico dos efluentes para fins de fertirrigação.

A aplicação do APA em efluentes industriais, como os da indústria de tintas e frigoríficos, ainda carece de estudos específicos que abordem sua eficácia diante de complexas matrizes químicas. No entanto, resultados preliminares indicam que o APA pode ser eficaz desde que o efluente seja previamente tratado para remoção de sólidos e contaminantes químicos potencialmente interferentes (Martínez-Hernández et al., 2023).

Culturas forrageiras como o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), a braquiária (*Urochloa* spp.) e a cana-de-açúcar forrageira apresentam elevada capacidade de resposta à fertirrigação com efluentes, devido ao seu ciclo rápido, elevado índice de interceptação de nutrientes e adaptação a solos tropicais (Silva et al., 2020; Azevedo et al., 2021). O uso de efluentes tratados com APA, além de fornecer água para o crescimento vegetal, contribui com a adição de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e micronutrientes, reduzindo a necessidade de fertilizantes minerais (Aghaei et al., 2023).

O estudo conduzido por Santos et al. (2023) verificou que a irrigação de *Panicum maximum* com efluente de abatedouro tratado com APA promoveu incremento significativo na produtividade de matéria seca (PMS), sem alterar a qualidade microbiológica da biomassa forrageira. Da mesma forma, Marcon et al. (2022) relataram que a aplicação de efluente tratado com APA não causou acúmulo de patógenos no solo nem nas folhas de gramíneas irrigadas, desde que respeitadas as doses de aplicação e o intervalo de segurança entre irrigações e colheitas.

Segundo Barros et al. (2022), a aplicação de efluente tratado com APA deve considerar parâmetros como carga orgânica, condutividade elétrica, pH, e concentrações de nutrientes e metais pesados. Embora o APA não altere significativamente o pH ou a salinidade do efluente tratado, o uso contínuo requer monitoramento, principalmente quanto ao acúmulo de sais no solo e aos possíveis efeitos na microbiota edáfica (Sartori et al., 2023).

Além disso, recomenda-se que a aplicação seja realizada preferencialmente por sistemas de irrigação localizada (gotejamento ou sulco), a fim de minimizar o contato direto com a parte aérea da planta, especialmente em sistemas de pastejo rotacionado. Em experimentos conduzidos por De Nardi et al. (2023), verificou-se que o uso de efluente tratado com APA por gotejamento em Tifton 85 (*Cynodon* spp.) promoveu incremento de 28% na produtividade de forragem e redução de 35% no uso de fertilizantes comerciais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. G. et al. Tratamento e reúso de efluentes industriais: desafios e oportunidades. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, n. 1, p. 45–56, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522023280100003>
- ALVES, T. A. et al. Desinfecção de efluentes com ácido peracético: eficiência microbiológica e implicações ambientais. **Ambiente & Água**, v. 16, n. 6, p. e2721, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2721>
- AZEVEDO, L. G.; MORAES, M. T.; CARLESSO, R. Reuso de efluente doméstico tratado na produção de forrageiras tropicais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 1, p. 60–67, 2021.
- BARROS, M. T. L.; SILVA, T. A.; RODRIGUES, P. H. M. Monitoramento do uso de efluentes tratados na irrigação de pastagens. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 42, n. 4, p. 350–358, 2022.
- BASTOS, L. F. et al. Reúso agrícola de efluentes sanitários desinfetados com PAA: efeitos microbiológicos e agronômicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 139–146, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p139-146>
- CHEN, X. et al. Peracetic acid in wastewater treatment: Monitoring challenges and operational control strategies. **Water Research**, v. 243, p. 120235, 2023. DOI: [10.1016/j.watres.2023.120235](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120235).
- COUTO, R. M. et al. Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater: performance and biogas production. **Renewable Energy**, v. 181, p. 487–495, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.051>
- DE NARDI, B.; SOUZA, C. F.; VARGAS, V. P. Fertirrigação com efluente tratado com ácido peracético em gramíneas forrageiras: produtividade e segurança. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 54, n. 2, p. e20221038, 2023.
- DUTRA, M. A. et al. Caracterização de efluentes de abatedouro e alternativas de manejo ambiental. **Ciência Animal Brasileira**, v. 21, p. e48264, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-6891v21e-48264>
- FENG, Y. et al. Ecotoxicological impacts of peracetic acid residuals in aquatic environments: A review of current knowledge and future needs. **Environmental Pollution**, v. 314, p. 120342, 2022. DOI: [10.1016/j.envpol.2022.120342](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120342).
- FERREIRA, D. S. et al. Aplicação do ácido peracético na desinfecção de efluentes: análise de subprodutos e eficiência. **Revista DAE**, v. 67, n. 221, p. 1–10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.011>
- FERRERA-CERRATO, R. et al. Peracetic acid as a sustainable disinfectant for agricultural wastewater reuse: Impacts on soil microbiota and crop development. **Agricultural Water Management**, v. 267, p. 107642, 2022. DOI: [10.1016/j.agwat.2022.107642](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107642).

- GABRIELLI, M. et al. Comparative life cycle assessment of peracetic acid and ozone disinfection systems in municipal wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v. 858, p. 159924, 2023. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.159924](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159924).
- GEHR, R. et al. Disinfection with peracetic acid: a review. **Water Research**, v. 205, p. 117718, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117718>
- GOMES, R. L. et al. Reuse of slaughterhouse wastewater disinfected with peracetic acid in the cultivation of tropical forage grasses. **Journal of Cleaner Production**, v. 387, p. 135858, 2023. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.135858](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858).
- GUO, W. et al. Residual peracetic acid in treated wastewater: Formation, stability and removal. **Chemosphere**, v. 299, p. 134372, 2022. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.134372](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134372).
- HAMILTON, A. J. et al. Agricultural reuse of wastewater: a global review with regional perspectives. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 550–568, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.026>
- HAN, J. et al. Impact of peracetic acid disinfection on microbial communities in activated sludge and subsequent recovery. **Water Research**, v. 245, p. 120628, 2023. DOI: [10.1016/j.watres.2023.120628](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120628).
- KIM, J. H. et al. Occupational exposure risk assessment of peracetic acid used in food and water disinfection. **Journal of Occupational Health**, v. 64, p. e12391, 2022. DOI: [10.1002/1348-9585.12391](https://doi.org/10.1002/1348-9585.12391).
- KIZILOGLU, F. M. et al. Agricultural use of wastewater in irrigation: effects on the soil and plants. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 19, n. 4, p. 3243–3255, 2021. DOI: https://doi.org/10.15666/aeer/1904_32433255
- LI, X. et al. Combined advanced oxidation processes for treatment of paint industry wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105419>
- LIBERTI, L.; NOTARNICOLA, M. Advanced disinfection processes for municipal wastewater reuse: focus on peracetic acid. **Environmental Technology Reviews**, v. 10, n. 1, p. 21–35, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1902045>
- LIZOTTE, R. E. et al. Material compatibility and corrosion issues associated with peracetic acid use in water systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 149, n. 3, p. 04022120, 2023. DOI: [10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0002076](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002076).
- MARCON, J. L.; SCHMITT, D. E.; BRUNETTO, G. Aplicação de efluentes agroindustriais na produção de forragens: aspectos microbiológicos e produtivos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Seropédica, v. 17, n. 1, p. 112–125, 2022.
- MEDEIROS, E. R. et al. Reúso de água na agricultura: perspectivas para o semiárido brasileiro. **Irriga**, v. 25, n. 3, p. 500–516, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2020v25n3p500-516>

MORAES, M. T.; AZEVEDO, L. G.; SILVA, L. T. Reúso agrícola de efluentes tratados com PAA: viabilidade em pastagens tropicais. **Agrarian**, Dourados, v. 16, n. 59, p. 34–45, 2023.

MUNIR, M. et al. Evaluation of peracetic acid as a disinfectant for wastewater reuse: effectiveness and influencing factors. **Science of the Total Environment**, v. 754, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142197>

OLIVEIRA, R. R.; RODRIGUES, A. C.; SILVA, T. A. Avaliação da eficiência do ácido peracético na desinfecção de efluentes de abatedouro. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 211–218, 2022.

PALMEIRA, A. R. et al. Effectiveness of peracetic acid for pathogen inactivation in high-strength wastewater under different organic loads. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 3, p. 110672, 2023. DOI: [10.1016/j.jece.2023.110672](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110672).

PEDRERO, F. et al. The use of treated wastewater for agricultural irrigation in the Mediterranean basin: current status and future perspectives. **Agricultural Water Management**, v. 238, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106217>

PEDRERO, F. et al. Water reuse in agriculture: current status and future perspectives. **Agricultural Water Management**, v. 251, 107005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107005>

PEREIRA, J. F. et al. Combined use of industrial and agro-industrial effluents for agricultural reuse: a feasibility assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 412, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137139>

PEREIRA, M. L. et al. Peracetic acid as a safe and efficient disinfectant in wastewater reuse. **Environmental Technology Reviews**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1874081>

PEREZ, J. R. et al. Peracetic acid disinfection of treated effluents: impact on agronomic properties. **Water Science and Technology**, v. 85, n. 7, p. 2022–2032, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.110>

QADIR, M. et al. Wastewater production, treatment, and use in irrigation: a global review. **Irrigation and Drainage**, v. 69, p. 19–41, 2020. <https://doi.org/10.1002/ird.2409>

RAMOS-PAYÁN, R. et al. Peracetic acid versus ozone: Microbial inactivation performance in decentralized wastewater systems. **Environmental Technology & Innovation**, v. 32, p. 102883, 2024. DOI: [10.1016/j.eti.2023.102883](https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.102883).

REZENDE, L. P. et al. Oxidative disinfection with peracetic acid: mechanisms and environmental safety. **Journal of Water Process Engineering**, v. 49, 102987, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102987>

RODRÍGUEZ-CHUECA, J. et al. Disinfection of treated effluents with ozone and peracetic acid: Mechanisms and disinfection by-products. **Chemosphere**, v. 295, p. 133932, 2022. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.133932](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133932).

SANTANA, A. C. et al. Use of peracetic acid-treated effluent from bovine slaughterhouse in forage irrigation: Agronomic and microbiological evaluation. **Agricultural Water Management**, v. 268, p. 107650, 2022. DOI: [10.1016/j.agwat.2022.107650](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107650).

SANTOS, R. B.; SOUZA, R. F.; LOPES, C. A. Segurança microbiológica da forragem produzida com efluente de abatedouro tratado com ácido peracético. **Journal of Cleaner Agriculture**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 88–95, 2023.

SARTORI, A. M.; ZANIN, E. M.; CARDOSO, A. M. Impactos ambientais do uso de efluentes desinfetados com ácido peracético na agricultura irrigada. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 18, n. 2, p. e2997, 2023.

SHARMA, R. et al. Toxicity and treatment of wastewater from paint and pigment industries: current status and future perspectives. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 60318–60337, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15006-5>

SILVA, F. C.; REIS, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B. Crescimento de capim-elefante adubado com efluente agroindustrial tratado. **Revista Verde**, Mossoró, v. 15, n. 2, p. 313–319, 2020.

SILVA, J. A. et al. Characterization and treatment of slaughterhouse wastewater: a review. **Water**, v. 12, n. 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12061624>

ŚMIECHOWICZ, A. et al. Application of peracetic acid in slaughterhouse wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 305, p. 114370, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114370>

SOUZA, L. D. et al. Agronomic and physiological responses of *Panicum maximum* irrigated with peracetic acid-disinfected slaughterhouse wastewater. **Grass and Forage Science**, v. 78, n. 2, p. 237–248, 2023. DOI: [10.1111/gfs.12610](https://doi.org/10.1111/gfs.12610).

WHO. Water reuse in agriculture: guidance for safe use. **World Health Organization**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8675en>

WU, J. et al. Emerging pollutants in the effluents from paint manufacturing: characterization and treatment. **Chemosphere**, v. 260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127574>

YANG, J. et al. Economic and environmental comparison of disinfection technologies in wastewater reuse: Focus on peracetic acid, ozone and chlorine. **Journal of Cleaner Production**, v. 407, p. 137126, 2023. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.137126](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137126).

YANG, J. et al. Regulatory gaps and challenges in the environmental application of peracetic acid for water reuse. **Journal of Cleaner Production**, v. 405, p. 137098, 2023. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.137098](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137098).

ZAHMATKESH, B. et al. Fate and toxicity of peracetic acid in the environment: a review. **Environmental Research**, v. 216, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114620>

ZARZO, D. et al. Water reuse in the European Union: current status, challenges and future perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 287, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112270>

ZHAO, M. et al. Peracetic acid exposure alters microbial community structure in irrigation water and rhizosphere soil. **Science of the Total Environment**, v. 847, p. 157693, 2023. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.157693](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157693).

ZHOU, Y. et al. Comparative study of disinfection technologies for wastewater reuse: ozone, chlorine, and peracetic acid. **Chemosphere**, v. 255, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126974>

CAPÍTULO II

Produtividade e composição químico-bromatológica do capim Mombaça fertirrigado com efluente de abatedouro bovino com e sem desinfecção com ácido peracético

RESUMO

Águas residuárias provenientes de abatedouro de bovinos são fontes de nutrientes para a fertirrigação em culturas devido a presença de nitrogênio e fósforo em sua composição. Com o objetivo de analisar o rendimento e composição nutricional do capim Mombaça (*Panicum maximum*) exposto a distintas doses do efluente proveniente do abate de bovinos, o ensaio foi realizado seguindo um delineamento experimental inteiramente casualizados, em esquema fatorial duplo 5x2, consistindo em cinco concentrações em quintuplicata (Controle: Água; ET₂₅ = 25% de efluente tratado com APA + 75% de água; E₂₅ = 25% efluente + 75% de água; ET₅₀ = 50% de efluente tratado com APA + 50% de água; E₅₀ = 50% de efluente + 50% de água; ET₇₅ = 75% de efluente tratado com APA + 25% de água; E₇₅ = 75% de efluente + 25% de água; E₁₀₀ = 100% de efluente) com e sem tratamento com APA. Após análises químicas e bromatológicas do capim-Mombaça, concluiu-se que a presença de nitrogênio, fósforo, magnésio e cálcio aumentou progressivamente com o aumento da quantidade de efluente utilizado, em comparação com as plantas cultivadas apenas com água (grupo controle). Foi observada uma tendência de aumento na quantidade de proteína bruta, matéria mineral e nutrientes digestíveis totais (NDT); e uma redução na concentração de fibra bruta e extrato etéreo no grupo tratado com E₁₀₀ = 100% de efluente. O uso do APA no efluente de abate de bovinos não afetou negativamente a fisiologia vegetal nem a composição bromatológica do capim-mombaça e contribuiu para a promoção da agricultura circular e do uso eficiente de recursos naturais em sistemas de produção intensiva de forragem.

Palavras-chave: Efluente de abate de bovino, Fertirrigação, Capim Mombaça, Nutrição, *Panicum maximum*.

1 INTRODUÇÃO

Na busca por uma produção sustentável em sistemas agrícolas, a fertirrigação surge como uma técnica promissora de integração entre a irrigação e a aplicação de nutrientes através da água (Sérvulo et al., 2024). Nesse sentido, o uso de efluentes de abatedouros bovinos como fonte de nutrientes para a fertirrigação, tem se destacado por seu potencial em reduzir a dependência de fertilizantes químicos e promover a reciclagem de resíduos orgânicos (Śniatała et al., 2024).

Em pastagens, a utilização desses efluentes para fertirrigação é notada como uma abordagem inovadora que pode beneficiar tanto o manejo dos resíduos gerados pela atividade quanto a nutrição das plantas (Alves et al., 2023). A composição nutricional dos efluentes de abate de bovinos é rica em macro e micronutrientes essenciais para o crescimento das plantas, como nitrogênio, fósforo e potássio. No entanto, a presença de patógenos e de compostos potencialmente tóxicos também é uma preocupação relevante (Menegassi et al., 2020).

Qualquer tecnologia de tratamento de efluentes no solo, por mais avançada que seja, será inevitavelmente falha se não considerar os riscos de contaminação ambiental (Silva et al., 2016). Dessa forma, o uso de efluentes na fertirrigação de culturas agrícolas requer tecnologia e práticas de cuidado adequadas para minimizar a contaminação do solo, dos produtos agrícolas e dos agricultores (Dhayal and Lal, 2023). Com isso, é essencial realizar análises detalhadas desses efluentes para garantir que sua aplicação não comprometa a saúde do solo, das plantas e dos animais que consumirão a pastagem.

Para evitar a adição de nutrientes em quantidades superiores às exigidas pela cultura e muitas vezes até ultrapassando sua capacidade de retenção no solo, recomenda-se determinar a dosagem de resíduos orgânicos a serem aplicados, com base nos nutrientes, em quantidades que satisfaçam a dosagem mínima (Chojnacka et al., 2023). Além disso, a possibilidade de inserir contaminantes microbiológicos que podem ser lixiviados do solo para águas subterrâneas ou escoados para águas superficiais, também deve ser considerada na definição da taxa de aplicação, tornando evidente a necessidade da adoção do uso de agentes desinfetantes para o tratamento desses efluentes.

Nesse sentido, o ácido peracético (APA) tem se evidenciado como um agente desinfetante efetivo no tratamento de efluentes destinados à utilização agrícola, devido à sua capacidade de eliminar uma ampla variedade de agentes patogênicos com impacto ambiental reduzido (Costa et al., 2024). Pesquisas científicas comprovam que, quando utilizado corretamente, o peróxido de hidrogênio não apenas diminui consideravelmente a carga microbiana, incluindo bactérias, vírus e protozoários, como também se decompõe em subprodutos inócuos, como ácido acético, água e oxigênio, diminuindo os riscos de contaminação do solo e da água.

No entanto, ainda há uma lacuna significativa no conhecimento sobre os efeitos a longo prazo dessa prática, tanto do ponto de vista agrônômico quanto ambiental. Outros estudos são necessários para desenvolver diretrizes claras e práticas que possam ser adotadas de forma segura pelos agricultores. Dessa forma, sabendo-se do potencial do reúso de efluentes para fertirrigação em culturas agrícolas, o presente trabalho busca analisar o rendimento e composição nutricional do capim-mombaça exposto a distintas doses do efluente proveniente do abate de bovinos com e sem a adição do desinfetante ácido peracético (APA).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Solo utilizado para o estudo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Instituto Tocantinense Presidente Antonio Carlos – ITPAC Porto Nacional, localizada em Porto Nacional - TO, situada nas coordenadas geográficas 10° 69' 57" S, 48° 38' 48" O, em altitude de 212 m. O solo utilizado no presente experimento foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo suas características físicas e químicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas do solo na camada de 0 a 20 cm em Latossolo Vermelho-Amarelo. Porto Nacional – TO.

	pH (H ₂ O)	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al	V (%)	M.O
		mg/dm ³		cmolc/dm ³					g.dm ³
Solo	4.20	45,3	0.05	0.03	0.22	0.21	3.05	9.16	13.5

Argila (HMFS + Na g/kg) = 421.6; Silte g/kg estimado = 91.2; Areia total (peneira g/kg) = 487.2; pH em H₂O, KCl, CaCl₂ -Relação 1:2,5; P, Na, K, Fe, Zn, Mn, Cu - Extrator Mehlich 1.81; Ca, Mg, Al - Extrator KCl 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L, pH4,20.

A quantidade de calcário necessário para correção do pH do solo foi calculada utilizando-se o método da saturação por bases, com o qual se obteve a recomendação de aplicação de 3,19 t ha⁻¹. Durante o período experimental, não foram feitas adubações de cobertura no capim.

2.2 Efluente de abate de bovino utilizado para fertirrigação

A coleta de efluente bovino foi realizada no abatedouro municipal de Gurupi – Tocantins, Brasil, o qual abate em média 1.200 cabeças de gado por mês. O efluente foi coletado diretamente na estação de tratamento após passar pelos processos de tratamento primário e secundário (efluente) e no laboratório recebeu o tratamento com APA comercial 15% na concentração 10 mg/L (efluente tratado com APA). Em seguida os efluentes não desinfetado e desinfetado com APA, foram avaliados pelos parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização físico-química e microbiológica do efluente bovino utilizado no experimento.

Parâmetros	Efluente	Efluente tratado com APA (10 mg/L)
pH	7,21	7,11
Temperatura	26,8	26,06

DQO (mg/L)	480	370
OD (mg/L)	3,55	5,0
Condutividade (μ S/cm)	914,5	843,3
Salinidade (mg/L)	435	400
Turbidez (NTU)	60,6	60,6
Cor real (uC)	386	216
Nitrogênio total (mg/L)	1147	972
Sódio (mg/L)	141,11	136,47
Potássio (mg/L)	31,3	30,9
Magnésio (mg/L)	9,86	9,92
Cálcio (mg/L)	62,11	59,86
Molibdênio (mg/L)	0,01	0,02
Fósforo (mg/L)	15,54	15,71
Zinco (mg/L)	0,16	0,21
Ferro (mg/L)	0,32	0,38
Cobre (mg/L)	0,01	0,01
Níquel (mg/L)	0,01	0,02
Manganês (mg/L)	0,23	0,23
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	1350	< 1
Coliformes totais (UFC/100mL)	8000	100
APA residual (mg/L)	-	0.1

Fonte: O autor (2025).

2.3 Preparação das amostras de capim-Mombaça

2.3.1 Plantio

Para conduzir o estudo, optou-se pelo capim-Mombaça como planta principal devido à sua necessidade maior de nutrientes, assim como a demanda por solo profundo, bom sistema de drenagem e adaptação ao clima local, que é caracterizado por altas temperaturas e mais de 1.000 mm de chuva por ano. O plantio do capim-Mombaça foi realizado em vasos de dez litros, com a utilização de sementes de valor cultural igual a 25,5% aplicadas sobre o solo com a utilização de uma peneira. Utilizaram-se 5g de sementes de valor cultural de 25,5%, o que correspondeu a 25 g por parcela experimental.

Implantou-se o experimento no delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial duplo 5x2, consistindo em cinco concentrações (Controle: Água; ET₂₅ = 25% de efluente tratado com APA + 75% de água; E₂₅ = 25% efluente + 75% de água; ET₅₀ = 50% de efluente tratado com APA + 50% de água; E₅₀ = 50% de efluente + 50% de água; ET₇₅ = 75% de efluente tratado com APA + 25% de água; E₇₅ = 75% de efluente + 25% de água; E₁₀₀ = 100% de efluente) com e sem a desinfecção com APA, todos com cinco repetições.

A exigência hídrica da cultura em todos os vasos foi calculada mediante a evapotranspiração diária de referência, pois a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) é de grande importância para o uso eficiente da água. A demanda hídrica da cultura em todas as parcelas foi calculada utilizando a evapotranspiração de referência diária (ET_0), utilizando o método Penman-Monteith $ET_0 \times K_c = ET_c$ (Allen, 2006), com base em dados obtidos através de pesquisas na internet.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada utilizando valores diários do coeficiente de cultura (K_c). Diariamente foram aplicadas lâminas acumuladas visando repor a ET_c . Para o cálculo dessas lâminas utilizou-se como concentração referência o valor 40 kg/ha de nitrogênio. Determinou-se a lâmina de água e a fertirrigação com a pesagem dos vasos, observando que a diferença de pesos correspondia o volume aplicado para elevar a capacidade de vaso.

2.3.2 Fertirrigação

A aplicação do efluente (com e sem desinfecção com APA) foi iniciada quando o capim apresentava cerca de 15 cm de altura. Para a aplicação do efluente, utilizou-se uma estrutura hidráulica para armazenamento e distribuição de águas residuárias nas parcelas experimentais, com frequência de irrigação de dois dias até completar o valor total de cada parcela. Durante o processo de irrigação com o efluente, foram feitos dois cortes no capim-Mombaça, em intervalos variando entre 25 e 35 dias, dependendo do crescimento das plantas, com o intuito de avaliar a produtividade.

2.3.3 Avaliação das propriedades químico-bromatológicas

As amostras de capim foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar forçada a 65 °C, por um período de 72 horas. As folhas foram então moídas em um moinho do tipo Willey e o pó resultante foi armazenado em sacos de polietileno identificados e lacrados. Posteriormente, as amostras foram enviadas para análise bromatológica, química foliar e para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn e Na na matéria seca.

Para determinar a quantidade de nitrogênio total, o método de Kjeldahl foi empregado. A mensuração das quantidades de fósforo, potássio e sódio ocorreu após a digestão nítrico-perclórica das amostras, por meio de espectrofotometria e fotometria de chama, respectivamente. Já a avaliação das concentrações dos demais nutrientes foi realizada por

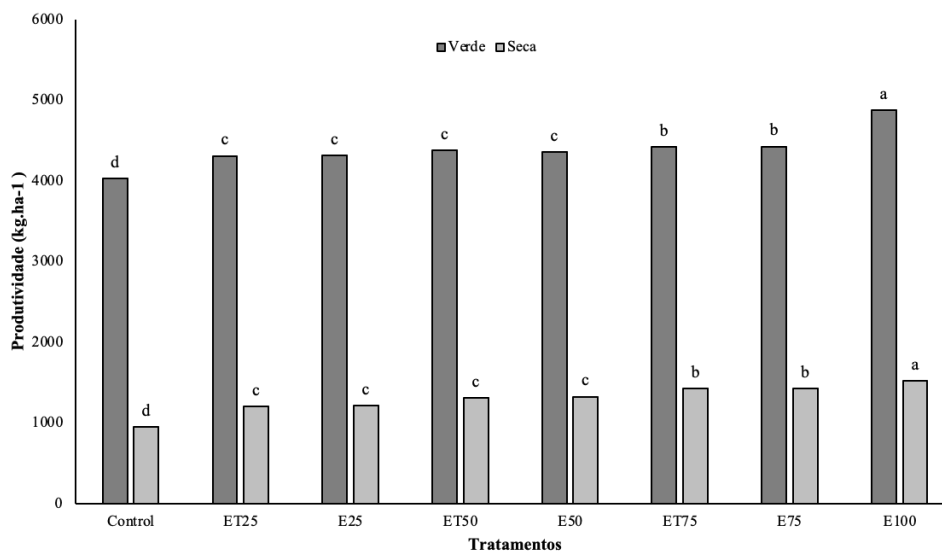
espectrofotometria de emissão de plasma, seguindo as orientações da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (1999).

Os dados foram submetidos às análises de variância. Em seguida, as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Dunnet e Tukey a 5% de probabilidade. Para a realização das análises estatísticas, foi utilizado o programa estatístico SISVAR® (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da produtividade do Capim Mombaça submetido aos tratamentos de fertirrigação com efluente de abate de bovinos (E) com e sem desinfecção com APA (ET) apresentaram variações significativas (Figura 1).

Figura 1 – Produtividade de matéria verde e seca das folhas de capim Mombaça nos em função da fertirrigação com efluente de abate de bovinos com e sem desinfecção com APA.



Control: Água; ET₂₅ = 25% de efluente tratado com APA + 75% de água; E₂₅ = 25% efluente + 75% de água; ET₅₀ = 50% de efluente tratado com APA + 50% de água; E₅₀ = 50% de efluente + 50% de água; ET₇₅ = 75% de efluente tratado com APA + 25% de água; E₇₅ = 75% de efluente + 25% de água; E₁₀₀ = 100% de efluente. Valores seguidos pela mesma letra não difere estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. **Fonte:** O autor (2025).

Os resultados apresentados revelaram um aumento significativo de 550 kg·ha⁻¹ na produtividade de matéria verde com a aplicação da fertirrigação com o efluente no capim Mombaça. Em relação à matéria seca, as plantas submetidas a uma menor quantidade de efluente mostraram um melhor aspecto visual, apesar de não se observarem deficiências nutricionais no controle. Adicionalmente, as plantas apresentaram uma maior produtividade de

matéria verde e seca, com os melhores resultados sendo obtidos pelas plantas tratadas com ET₇₅, E₇₅ e E₁₀₀, que receberam maiores doses de efluente bovino e, conseqüentemente, uma maior quantidade de nutrientes.

Os resultados obtidos apontam que, para esse tipo de solo, gramínea e níveis testados, o efluente proveniente de abatedouro bovino se mostrou eficaz em aumentar de forma significativa a produção, o que está associado aos nutrientes contidos no efluente que foram disponibilizados no solo, embora o emprego do efluente desinfestado com APA tenha resultado na diminuição dos níveis de nitrogênio disponível, além de influenciar a solubilidade e disponibilidade de outros nutrientes, como fósforo e potássio, ao alterar o pH do efluente (Tabela 2).

Conforme os resultados, constata-se que o APA, quando utilizado nas concentrações adequadas, não compromete o desenvolvimento vegetal nem a produtividade das gramíneas, reforçando sua viabilidade agrônômica e ambiental (Santana et al., 2022).

O capim-mombaça é uma das gramíneas tropicais de maior produtividade e exigência nutricional, especialmente em nitrogênio e potássio. Por isso, a aplicação de efluentes ricos em matéria orgânica e nutrientes, como os de origem bovina, pode representar um insumo valioso para a produção animal. Resultados experimentais demonstram que a aplicação de efluente desinfestado com APA não afetou negativamente o acúmulo de massa seca e verde da forrageira, mesmo após sucessivos ciclos de irrigação (Gomes et al., 2023). Pelo contrário, em alguns casos, observou-se incremento significativo na produção, indicando o potencial bioestimulante dos nutrientes presentes no efluente.

Em experimentos conduzidos sob condições tropicais, plantas de *P. maximum* irrigadas com efluente bovino desinfestado apresentaram padrões normais de crescimento foliar, altura de planta e perfilhamento, comparáveis ao controle com irrigação convencional e adubação mineral. Esses dados indicam que o uso do APA não afeta negativamente a fisiologia vegetal nem a composição bromatológica da forragem (Souza et al., 2023).

Ao realizarem um estudo sobre o uso de efluente de frigoríficos de bovinos, (da Silva Neto et al., 2010) perceberam um aumento na produção de massa fresca e seca do capim *Brachiaria brizantha* cv. Marandu com o aumento das doses aplicadas. Da mesma forma, Serafim e Galbiatti, (2012), ao analisarem a produção e composição química do *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, fertilizado com efluente de suinocultura, observaram um aumento significativo na produção de massa fresca e seca com o aumento das doses de efluentes.

No reúso de efluente proveniente de um abatedouro de aves para irrigar capim-Mombaça (Lozano et al., 2015), verificaram que houve um aumento significativo na produção

de matéria fresca e seca à medida que as doses do efluente foram incrementadas. Por outro lado, (Santos et al., 2013) conduziram uma pesquisa similar, porém utilizando efluente de laticínio para irrigar capim-Mombaça (*Panicum maximum*) em solo arenoso. Os autores concluíram que o efluente proveniente do laticínio tem potencial para fornecer nutrientes para a cultura forrageira.

Durante um estudo realizado por (Drumond et al., 2006), verificou-se que a aplicação de efluente suíno no capim Tifton 85 resultou em um aumento significativo na quantidade de material seco produzido, à medida em que a quantidade de efluente aplicada aumentava. Os autores observaram que na dose de 200 m³ ha⁻¹, a quantidade de material seco produzido foi duas vezes maior em comparação com o tratamento que utilizava apenas água (controle).

De maneira semelhante, o estudo realizado por (Silva et al., 2018) verificou que a quantidade de matéria seca do capim Vaqueiro aumentou significativamente após a aplicação de 450 m³ ha⁻¹ano⁻¹ de efluente de graxaria em comparação com o tratamento sem adubação (controle), alcançando uma produção de matéria seca de 23 t ha⁻¹. Esses resultados indicam que os efluentes têm potencial para substituir os fertilizantes minerais na produção de matéria seca de plantas forrageiras.

Em relação a concentração de nutrientes nas folhas do capim-Mombaça foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para o N, P, K, Ca e Mg (Tabela 3).

Tabela 3 - Concentrações de nutrientes nas folhas do capim-mombaça em função da fertirrigação com efluente de abate de bovinos com e sem desinfecção com APA.

Tratamento	Concentração									
	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)	Cu (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
Controle	0,80	0,08	0,96	0,36	0,02	0,02	5	395	80	66
ET ₂₅	0,80	0,90*	1,04*	0,40	0,05	0,02	5,5	405	83	65
E ₂₅	0,80	0,90*	1,14*	0,44	0,05	0,02	5,3	405	83	65
ET ₅₀	0,80	0,80*	1,00*	0,42	0,06	0,03	5,5	405	85	67
E ₅₀	0,80	0,90*	1,04*	0,44	0,06	0,03	5,5	405	85	67
ET ₇₅	1,27*	0,70*	1,00*	1,00*	0,05	0,02	5,5	405	85	67
E ₇₅	1,32*	0,92*	1,00*	1,04*	0,08*	0,02	5,5	405	85	67
E ₁₀₀	1,40*	0,24*	1,52*	1,20*	0,10*	0,03	5,5	405	85	67

Controle: Água; ET₂₅ = 25% de efluente tratado com APA + 75% de água; E₂₅ = 25% efluente + 75% de água; ET₅₀ = 50% de efluente tratado com APA + 50% de água; E₅₀ = 50% de efluente + 50% de água; ET₇₅ = 75% de efluente tratado com APA + 25% de água; E₇₅ = 75% de efluente + 25% de água; E₁₀₀ = 100% de efluente. Em cada corte nas colunas as médias com asterisco diferem do tratamento controle pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2025).

O teor de fósforo presente nas folhas do capim, em diferentes concentrações de efluente bovino (Tabela 3), variaram entre 0,24% e 0,92%, constatando que a presença do efluente na irrigação aumentou significativamente o teor desse nutriente na parte aérea da planta em comparação com o controle (água). De acordo com estudos de (Freitas et al., 2007), esses valores são suficientes para atender às necessidades de bovinos de corte, de leite e de ovinos. Segundo (Malavolta et al., 1997), estes valores são considerados adequados, visto que os níveis de fósforo nas folhas devem variar entre 0,16 e 1,1 dag kg⁻¹.

A redução da quantidade de fósforo com a utilização de 100% de efluente bovino não tratado na irrigação do capim (E₁₀₀) pode ter sido ocasionado pelo fornecimento de nutrientes minerais, principalmente de nitrogênio. O nitrogênio quando presente no efluente na forma de cátion dificulta a absorção de K, do mesmo modo que quando presente na forma aniônica (NO₃⁻) pode prejudicar a absorção de P, pois o equilíbrio ânion-cátion afeta a absorção de nutrientes. Ou seja, o nitrogênio pode estar presente no efluente em maior quantidade na forma de ânion o que pode prejudicar a absorção de outros ânions (Uçgun and Altindal, 2021).

Observa-se que nos tratamentos ET₅₀ e ET₇₅, em que foi utilizado efluente tratado com APA, os teores de fósforo também sofreram oscilações. Essas variações podem ser atribuídas ao uso de APA que durante o processo de desinfecção atua como um oxidante potente, promovendo reações que podem alterar a forma química do fósforo presente no efluente (Collivignarelli et al., 2017). Especificamente, o APA pode oxidar compostos orgânicos de fósforo, convertendo-os em formas menos solúveis ou precipitando-os como fosfatos insolúveis, o que reduz sua biodisponibilidade no solo. Contudo, é possível que a combinação de adubação química com o uso de fertirrigação com efluente bovino seja uma alternativa viável para ajustar os níveis de fósforo nas plantas, resultando em uma redução dos custos com fertilizantes minerais.

Houve uma grande variação nos níveis de potássio nas folhas das plantas, mesmo dentro do mesmo tratamento (Tabela 3). De acordo com Malavolta et al. (1997), os níveis de potássio no capim-Mombaça variam de 1,43% a 1,84%. Foi observado que apenas no tratamento E₁₀₀ a concentração de potássio estava dentro desse intervalo. Nenhum dos outros grupos atingiu níveis satisfatórios desse nutriente nas plantas, apesar de demonstrarem diferenças estatísticas em relação ao tratamento controle.

Os teores médios de N aumentaram à medida que a dose de efluente aplicada ultrapassou 50%, demonstrando maior presença desse nutriente quando o efluente está mais concentrado. Os níveis de nitrogênio presentes nas folhas foram mais altos nos tratamentos ET₇₅ (1.27%), E₇₅ (1.32%) e E₁₀₀ (1.4%) (Tabela 3) do que os valores relatados por Malavolta et al. (1997), que

variaram de 1,13 a 1,5%. Em um estudo realizado por Freitas et al. (2007) sobre a composição química e bromatológica do capim-Mombaça, utilizando diferentes doses de N (70, 140, 210, 280 kg ha⁻¹) aplicadas como ureia no Cerrado goiano, foram encontrados teores de nitrogênio entre 1,38 e 1,68 dag kg⁻¹, indicando uma rápida liberação do N proveniente do efluente utilizado neste experimento. Além disso, não foram observados impactos negativos na absorção devido à presença de outros íons no efluente bovino em relação a esse aspecto específico.

Embora observados valores significativos apenas nos respectivos tratamentos com maior aporte de volume do efluente e conseqüentemente de N, observa-se que o APA presente no tratamento ET₇₅ (1,27 % N), devido às suas propriedades oxidantes, pode promover a oxidação de compostos nitrogenados, como amônia (NH₃) e nitrito (NO₂⁻), convertendo-os em formas menos biodisponíveis, como o nitrogênio gasoso (N₂) ou em nitratos (NO₃⁻), que podem ser lixiviados facilmente.

De acordo com Du et al. (2018), essa oxidação pode resultar em uma redução significativa do nitrogênio disponível no efluente, diminuindo sua eficácia como fonte de nutrientes quando aplicado ao solo. A diminuição do teor de nitrogênio pode comprometer o valor agrônômico do efluente, especialmente em sistemas agrícolas com predominância de plantas forrageiras, que dependem desses resíduos como uma importante fonte de fertilização nitrogenada. Além disso, o tratamento com APA pode alterar o equilíbrio do pH do efluente, influenciando ainda mais a forma e a solubilidade do nitrogênio.

Verificou-se que os níveis de Ca foram superiores aos encontrados no grupo controle, indicando um aumento desse nutriente a partir da concentração mínima do efluente. De acordo com Malavolta et al. (1997), os níveis de Ca e Mg nas folhas são considerados adequados quando variam entre 04 a 1,02% e 0,12 a 0,22%, respectivamente. Nesse sentido, em contrapartida, os níveis de Mg sempre se mantiveram abaixo dos valores descritos por Malavolta et al. (1997) em todos os tratamentos realizados, uma vez que durante o processo de desinfecção, o APA, devido à sua natureza oxidante e acidificante, pode alterar a solubilidade desses minerais, promovendo a sua precipitação em formas menos solúveis, como carbonatos ou fosfatos de cálcio e magnésio. Esta precipitação pode reduzir a concentração desses cátions no efluente tratado, limitando suas biodisponibilidades quando aplicado ao solo. A acidificação do efluente pelo APA pode alterar o pH do solo após a aplicação, influenciando ainda mais a solubilidade e mobilidade de Ca²⁺ e Mg²⁺, podendo resultar em uma menor extração desses cátions pelas plantas.

Conforme Dhayal and Lal (2023), é aconselhável evitar adubações ricas em potássio para não afetar a absorção de cálcio e magnésio pelas plantas, o que pode resultar em menor

rendimento. Considerando que o tratamento E₁₀₀ possui uma concentração elevada de K em comparação aos demais elementos, é recomendável utilizá-lo como referência em situações reais de manejo para prevenir possíveis problemas nutricionais. Embora o APA seja menos reativo com potássio em comparação com outros nutrientes, como cálcio e magnésio, ele pode influenciar indiretamente a disponibilidade de K⁺ no solo após a aplicação do efluente tratado.

Além disso, Sérvulo et al. (2024) afirmam que o potássio presente em adubos orgânicos está na forma iônica e não em compostos orgânicos estáveis, o que torna o nutriente prontamente disponível para absorção pelas plantas. Sendo assim, o potássio presente no resíduo estará prontamente disponível no solo após a aplicação, podendo acarretar os impactos adversos mencionados. A interação do potássio com outros nutrientes presentes no solo, como cálcio e magnésio, pode ser afetada pela modificação das condições químicas do solo após a aplicação do efluente. Um equilíbrio adequado entre esses cátions é essencial para evitar antagonismos que possam prejudicar a absorção de potássio pelas plantas.

Explicita-se que os tratamentos que promoveram uma combinação efluente (tratado ou não) com água foram capazes de demonstrar resultados intermediários e, ainda que subsista a competente diluição do efluente, é possível alcançar resultados satisfatórios em relação à boa qualidade nutricional do capim Mombaça.

A Tabela 4 apresenta as diferenças estatísticas para os resultados médios das características bromatológicas do capim-Mombaça submetidos a fertirrigação com efluente bovino.

Tabela 4 – Médias das características bromatológicas do capim Mombaça: PB –Proteína Bruta; FB –fibra bruta; EE – extrato etéreo; MM –Matéria Mineral e NDT - Nutrientes digestíveis totais para os diferentes tratamentos de fertirrigação com efluente de abate de bovinos com e sem desinfecção com ácido peracético.

Tratamentos	Proteína Bruta (%)	Fibra Bruta (%)	Extrato Etéreo (%)	Matéria Mineral (%)	NDT (%)
Controle	6.30 d	30.5 a	2.20 a	5.60 c	52.60 c
ET ₂₅	8.20 b	29.50 b	1.80 b	6.60 b	61.00 b
E ₂₅	8.10 c	29.50 b	1.80 b	6.60 b	61.00 b
ET ₅₀	8.40 b	29.50 b	1.90 b	6.80 b	60.20 b
E ₅₀	8.30 b	29.50 b	1.80 b	6.80 b	60.10 b
ET ₇₅	8.27 b	29.50 b	1.90 b	7.40 a	60.80 b
E ₇₅	8.13 c	29.50 b	1.80 b	7.40 a	60.30 b
E ₁₀₀	9.70 a	28.30 c	1.40 c	7.50 a	77.30 a

Control: Água; ET₂₅ = 25% de efluente tratado com APA + 75% de água; E₂₅ = 25% efluente + 75% de água; ET₅₀ = 50% de efluente tratado com APA + 50% de água; E₅₀ = 50% de efluente

+ 50% de água; ET_{75} = 75% de efluente tratado com APA + 25% de água; E_{75} = 75% de efluente + 25% de água; E_{100} = 100% de efluente. Médias seguidas de letras diferentes na vertical diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

Fonte: O autor (2025).

Os teores de proteína bruta (PB) revelaram efeito significativo para os diferentes tratamentos. Verificou-se que o tratamento E_{100} = 100% de efluente (na ausência de APA) proporcionou teores de proteína bruta maiores, em torno de 9,7%, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. O menor teor de proteína bruta foi constatado no tratamento controle, sendo observada diferença estatística para o incremento de proteínas a partir da administração do efluente nas plantas. Os resultados apresentam semelhanças aos encontrados por Benett et al. (2008) que ao trabalharem com doses e fonte de nitrogênio nas características produtivas e qualitativas do capim Marandu, concluíram que com o aumento das doses de nitrogênio, ocasionalmente pode-se observar teores de PB acima de 9%, ou seja, a concentração de proteína de uma planta depende essencialmente da quantidade de nitrogênio absorvido, nutriente presente em grande concentração no efluente do presente estudo.

Sabe-se que teores de PB inferiores a 7% são limitantes à produção animal, causando menor consumo voluntário, redução na digestibilidade e balanço nitrogenado negativo (Machado et al., 1998). Com base nessa afirmação, pode-se constatar que o capim-Mombaça atenderia satisfatoriamente aos requerimentos mínimos desse nutriente para ruminantes em qualquer dos tratamentos aplicados (Tabela 4), uma vez que esse incremento nos teores de N no tecido vegetal pela aplicação do efluente traz resultados positivos além do estado nutricional das plantas, quando o N total é convertido em teor de proteína bruta (PB). Teores de proteína bruta elevados como esses, são desejáveis para suprir as exigências proteicas dos ruminantes, visto que a pastagem é a forma mais econômica de atender a demanda de proteína dos animais (Silva et al., 2018).

Salienta-se que há poucos estudos sobre a composição bromatológica de plantas forrageiras submetidas à fertirrigação com efluente bovino. No presente estudo, o tratamento E_{100} obteve maiores médias para Fibra Bruta, Extrato Etéreo e NDT em 28,3%, 1,4% e 77,3%, respectivamente. Em contrapartida, o mesmo tratamento e os tratamentos $E_{75:25}$ e $ET_{75:25}$ apresentaram maiores médias de matéria mineral, variando entre 7,4-7,5%.

Em relação à Fibra Bruta (FB), houve redução da mesma com a aplicação do efluente, sendo registrada a média de 30,5% para o tratamento com água (controle) e 28,3% para o E_{100} = 100% efluente. A fibra é um termo utilizado para descrever um aspecto totalmente relacionado à nutrição, sendo caracterizada como a porção não digerível ou de digestão lenta

do alimento que preenche o trato gastrointestinal, visto que um maior teor de FB normalmente indica uma maior lignificação da fibra. No entanto, os resultados de FB identificados são inferiores aos apontados por (Taffarel et al., 2014). Eles analisaram o capim Tifton 85 com rebrota de 28 dias, registrando teor de FB de 75%. Esse alto nível de FB encontrado nessas forrageiras está relacionado a características anatômicas, como a grande quantidade de tecido vascular típica de plantas C4 (Soest, 1994).

Em uma pesquisa avaliando a qualidade nutricional do capim Marandu fertilizado com efluente de esgoto tratado, Santos et al. (2017) observaram que a utilização contínua desse efluente, juntamente com doses crescentes, resultou em uma forragem de melhor qualidade nutricional, com teores de proteína bruta em torno de 16% e fibras em detergente neutro (FDN) com média de 60%. Por outro lado, Andrade et al. (2012) encontraram uma média de 76,7% de FDN para o capim Vaqueiro adubado com 600 kg ha⁻¹ de nitrogênio por ano, valor superior ao obtido no presente estudo.

O extrato etéreo (EE) representa os carboidratos de mais fácil digestão, como os açúcares, o amido e a pectina. Dessa forma, o maior teor de extrato etéreo no tratamento controle, deve estar relacionado ao conteúdo de pectina na parede celular, visto que neste tratamento a FB também foi maior. Conforme Soest (1994), a pectina é um polissacarídeo amorfo contido na parede celular, mas que é totalmente e rapidamente degradável pelos microrganismos ruminais. De acordo com os resultados, nota-se que a capim-Mombaça apresentou ótimo valor nutricional, marcado pelos altos teores de PB, principalmente quando cultivado sob aplicação de efluente bovino. Dessa forma, o efluente influenciou positivamente o valor nutritivo do capim-Mombaça, propiciando maior teor de PB e menor FB da forragem.

Quanto aos nutrientes digestíveis totais (NDT), estes são capazes de representar a quantidade de nutrientes disponíveis para fins de absorção. Plantas tratadas com 100% de efluente bovino não tratado com APA (E₁₀₀) apresentaram maior valor de NDT, o que implica, conseqüentemente, que os altos índices de efluente são capazes de contribuir para fins de melhoria da disponibilidade de nutrientes.

4 CONCLUSÕES

O capim-Mombaça que recebeu a aplicação de efluente bovino com e sem desinfecção com APA apresentou mudanças relevantes na quantidade de matéria verde e seca produzida durante o primeiro e segundo corte.

A ausência de efeitos negativos na produção de massa verde e seca do capim-mombaça irrigado com efluente bovino desinfetado com APA reforça o potencial dessa prática como uma solução ambientalmente correta e economicamente atrativa para o setor agropecuário.

A presença de nitrogênio, fósforo, magnésio e cálcio aumentou progressivamente com o aumento das quantidades de efluente utilizado, tanto com e sem desinfecção com AP, em comparação com as plantas cultivadas apenas com água (grupo controle).

Observou-se variações no teor de nutrientes como N, P ao comparar os tratamentos com efluente tratado com APA e o efluente não tratado, devido ao poder de oxidação do APA interferir na biodisponibilidade desses nutrientes.

Houve uma tendência de aumento na quantidade de proteína bruta, matéria mineral e NDT; e uma redução na concentração de fibra bruta e extrato etéreo no grupo tratado com E₁₀₀ = 100% de efluente na ausência de APA.

A adoção da fertirrigação com efluente bovino contribuiu para a melhoria da qualidade do capim-mombaça, principalmente devido ao incremento na quantidade de proteína e teores adequados de nutrientes.

O uso do APA não afeta negativamente a fisiologia vegetal nem a composição bromatológica do capim-mombaça e contribui para a promoção da agricultura circular e do uso eficiente de recursos naturais em sistemas de produção intensiva de forragem, além da proteção ambiental relativa a contaminação microbiológica.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: **FAO**, 2006.

ALVES, D. K. M. et al. Grain yield of maize crops under nitrogen fertigation using wastewater from swine and fish farming. **Agronomy, Basel**, v. 13, n. 7, p. 1834, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13071834>.

ANDRADE, A. S. et al. Growth and chemical composition of Tifton 85 and Vaquero in fertigated pastures. **Gl. Sci. Technol.**, v. 5, p. 56–68, 2012.

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. (Ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington D.C.: American Water Works Association, 2017.

BENETT, C. G. S. et al. Yield and bromatologic composition of Marandu grass as function of sources and doses of nitrogen. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1629–1636, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500041>.

- CHOJNACKA, K. et al. Management of biological sewage sludge: fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116602, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602>.
- COLLIVIGNARELLI, M. et al. Disinfection in wastewater treatment plants: evaluation of effectiveness and acute toxicity effects. **Sustainability**, v. 9, n. 10, p. 1704, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9101704>.
- COMPÊNDIO BRASILEIRO DE ALIMENTAÇÃO ANIMAL. **Matérias-primas e ingredientes**. 5. ed. São Paulo: SINDIRAÇÕES; ANFAL; CBNA, 2017. 204 p.
- COSTA, L. R. et al. Avaliação ecotoxicológica dos efluentes gerados pela indústria de tintas e de abates de bovinos combinados visando reuso agrícola. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, [S. l.], v. 11, n. 3, 2024. DOI: 10.20873/2024_v3_4.
- DA SILVA NETO, S. P. et al. Agronomic and nutritional characteristics of Marandu grass from the application of liquid slaughterhouse effluent. **Acta Scientiarum**. Animal Sciences, Maringá, v. 32, n. 1, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i1.6247>.
- DA SILVA, A. E. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- DA SILVA, P. L. et al. Evaluation of productivity parameters of fertigated Vaquero forage agroindustrial residual water. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 3, p. 0353–0358, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss3pp0353-0358>.
- DA SILVA, W. P. et al. Peracetic acid: structural elucidation for applications in wastewater treatment. **Water Research**, v. 168, p. 115143, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115143>.
- DELEVATTI, L. M. et al. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v. 9, p. 7596, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>.
- DHAYAL, D.; LAL, K. Nutritional status of wastewater irrigated soil under lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). **The Pharma Innovation**, v. 12, n. 2, p. 211–217, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22271/tpi.2023.v12.i2c.19148>.
- DING, Y. et al. Nitrate leaching losses mitigated with intercropping of deep-rooted and shallow-rooted plants. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, p. 364, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02733-w>.
- DRUMOND, L. C. D. et al. Dry matter production of irrigated Tifton 85 forage, with different liquid swine dejection rates. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 426–433, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000200010>.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

FREITAS, K. R. et al. Avaliation of composition chemical - bromatologic by Mombaça grass (*Panicum maximum* Jacq.) submeted of differents doses by nitrogen. **Biosci. J.**, v. 23, p. 1–10, 2007..

JING, T. et al. Role of calcium nutrition in plant physiology: advances in research and insights into acidic soil conditions - a comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 210, p. 108602, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108602>.

LOZANO, C. S. et al. Response of Mombaça grass (*Panicum Maximum* cv. Mombaça) submitted to wastewater application poultry slaughterhouse. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, p. 3796–3805, 2015. DOI: https://doi.org/10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2015_267.

MACHADO, A. O. et al. Evaluations of chemical composition and in vitro dry matter digestibility of cultivars and accesses of *Panicum maximum* Jacq. under two cutting heights. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 27, p. 1057–1063, 1998.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997.

MENEGASSI, L. C. et al. Reuse in the agro-industrial: Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119698, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119698>.

MÜLLER, M. dos S. et al. Productivity of *Panicum maximum* cv. Mombaça under rotational grazing and irrigation. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 3, p. 427–433, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000300003>.

PEREIRA, A. K. S. et al. A critical review on slaughterhouse wastewater: Treatment methods and reuse possibilities. **Journal of Water Process Engineering**, v. 58, p. 104819, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104819>.

PEREIRA, M. A. B. et al. Ecotoxicological evaluation of effluent from bovine slaughterhouses disinfected by peracetic acid (PAA) using the bioindicator *Girardia tigrina*. **Environmental Research**, v. 252, p. 118756, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118756>.

SANTOS, G. O. et al. Forage yield and quality of marandugrass fertigated with treated sewage wastewater and mineral fertilizer. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 4, p. 515, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i4.32828>.

SANTOS, P. M. dos; SANTOS, A. C. dos; SILVA, J. E. C. da. Waste the processing of milk products in pasture of Mombaça grass: attributes chemicals of grass and soil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, p. 377–390, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n1p377>.

SERAFIM, R. S.; GALBIATTI, J. A. Effect of the application of swine wastewater in *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Revista Colombiana de Ciências Animais**, v. 4, p. 185–203, 2012.

SÉRVULO, A. C. O.; SANDRI, D.; RAMOS, M. L. G. Reusing livestock farming wastewater for Tifton 85 irrigation: productivity, morphological, and bromatological indicators. *Ambiente e Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 19, p. 1–14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2954>.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. de. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2002. 235 p.

SILVA, J. G. D. et al. Domestic wastewater for forage cultivation in Cerrado soil. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 248, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n10p248>.

SILVA, J. G. D. et al. Fertigation with domestic wastewater: Uses and implications. **African Journal of Biotechnology**, v. 15, n. 20, p. 806–815, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJB2015.15115>.

ŚNIATAŁA, B. et al. Advancing sustainable wastewater management: A comprehensive review of nutrient recovery products and their applications. **Science of The Total Environment**, v. 937, p. 173446, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173446>.

SOEST, P. J. van. **Nutritional Ecology of the Ruminant**. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994.

SOUZA, A. K. N. et al. Theoretical–experimental evaluation of the effects of Fe³⁺ ions in the disinfection of water supply by peracetic acid. **Discover Water**, v. 4, p. 70, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00126-5>.

TONG, Y. et al. Reactive species in peracetic acid-based AOPs: A critical review of their formation mechanisms, identification methods and oxidation performances. **Water Research**, v. 272, p. 122917, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122917>.

UÇGUN, K.; ALTINDAL, M. Effects of increasing doses of nitrogen, phosphorus, and potassium on the uptake of other nutrients in sweet cherry trees. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 52, n. 11, p. 1248–1255, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1879122>.

CAPÍTULO III

Atributos químicos do solo e produtividade do capim Mombaça fertirrigado com efluentes da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reúso agrícola

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação combinada de efluentes da indústria de tintas e de abate de bovinos sobre os atributos químicos do solo cultivado com capim-mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5×2, com cinco tempos de coleta (0, 2, 4, 6 e 8 meses) e duas condições (com e sem aplicação do efluente combinado, na proporção 1:1), com cinco repetições. A fertirrigação com efluente combinado promoveu aumento expressivo na produtividade do capim Mombaça, alcançando média de 15,08 t ha⁻¹ de matéria seca. Observou-se maior extração de nitrogênio, cálcio e magnésio ao longo dos 12 meses, refletindo a eficiência nutricional dos tratamentos. Os resultados ainda indicaram que a aplicação dos efluentes promoveu aumento significativo nos teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio em comparação ao grupo controle, mantendo estabilidade ao longo do tempo, mesmo com a extração contínua pelos vegetais. Observou-se ainda incremento da capacidade de troca catiônica potencial, o que sugere melhoria na fertilidade do solo. Por outro lado, houve tendência de redução do pH e da saturação por bases, além do aumento da acidez potencial, indicando necessidade de monitoramento agrônomo. A CTC efetiva permaneceu estável, revelando equilíbrio dinâmico entre o aporte e a absorção de nutrientes. Os dados evidenciam o potencial agrônomo do reúso desses efluentes como alternativa sustentável para fertirrigação, porém destacam a importância de estudos de longo prazo que avaliem possíveis riscos ambientais e acúmulo de contaminantes. A pesquisa contribuiu para a integração entre manejo de resíduos líquidos e práticas agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: Efluente industrial. Fertilidade do solo. Fertirrigação. *Panicum maximum*.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da agricultura frente à crescente demanda por alimentos, fibras e energia tem imposto desafios significativos à sustentabilidade dos sistemas produtivos, sobretudo diante da escassez hídrica e da crescente geração de resíduos industriais (FAO, 2022; Moura et al., 2021). Nesse cenário, o reúso agrícola de efluentes surge como uma alternativa estratégica, associando o aproveitamento de águas residuárias ao fornecimento de nutrientes ao solo, promovendo conservação de recursos naturais e fertilização complementar (Santos et al., 2023; Kiziloğlu et al., 2020).

Dentre os diversos tipos de efluentes, destacam-se os provenientes da indústria de abate de bovinos e da fabricação de tintas. Esses resíduos apresentam elevada carga de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, carbonatos, além de outros elementos que podem influenciar significativamente os atributos químicos do solo (Lima et al., 2023; Zeng et al.,

2022). Parâmetros como pH, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases e teores de macro e micronutrientes podem ser afetados, alterando a fertilidade, a disponibilidade de nutrientes e o balanço iônico do solo (Yang et al., 2021; Nascimento et al., 2022).

Contudo, os efeitos da aplicação combinada desses efluentes ainda são pouco compreendidos, especialmente em sistemas de cultivo forrageiro. A dinâmica dos nutrientes no solo e os riscos de contaminação por compostos tóxicos exigem monitoramento detalhado e contínuo (Souza et al., 2023; Wang et al., 2020).

O capim-mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) apresenta-se como espécie de alto desempenho produtivo, sensível às variações da fertilidade do solo e com elevada capacidade de extração de nutrientes, sendo eficiente como planta bioindicadora (Mesquita et al., 2022). Essa gramínea responde significativamente à disponibilidade de macro e micronutrientes, além de ser influenciada por condições como acidez e salinidade do solo — atributos frequentemente alterados pela aplicação de efluentes (Melo et al., 2021).

Assim, compreender como os atributos químicos do solo se modificam em função da aplicação de efluentes combinados de indústrias de tintas e de abate de bovinos é fundamental para validar o reúso como prática sustentável e segura. Este estudo tem como objetivo avaliar os impactos dessa aplicação sobre a fertilidade do solo cultivado com capim-mombaça, com ênfase nos teores de nutrientes, na acidez, no pH e na capacidade de troca catiônica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Solo utilizado para o estudo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Instituto Tocantinense Presidente Antonio Carlos – ITPAC Porto Nacional Faculdade Presidente Antônio Carlos (ITPAC), localizada em Porto Nacional - TO, situada nas coordenadas geográficas 10°69'57" S, 48° 8'48" O, em altitude de 212 m.

O solo utilizado no presente experimento é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo condicionados em vasos de 5 L, sendo suas características físicas e químicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas do solo na camada de 0 a 20 cm em Latossolo Vermelho-Amarelo. Porto Nacional – TO.

	pH (H ₂ O)	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al	V (%)	M.O
		mg/dm ³		mmolc/dm ³					g.dm ⁻³
Solo	4.20	45,3	0.05	0.03	0.22	0.21	3.05	9.16	13.5

Argila (HMFS + Na g/kg) = 421.6; Silte g/kg estimado = 91.2; Areia total (peneira g/kg) = 487.2; pH em H₂O, KCl, CaCl₂ -Relação 1:2,5; P, Na, K, Fe, Zn, Mn, Cu - Extrator Mehlich 1.81; Ca, Mg, Al - Extrator KCl 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L, pH4,20.

2.2 Efluente da indústria de tinta e de abate de bovino utilizado para fertirrigação

Os efluentes foram coletados de indústrias regionais, sendo o efluente de abate de bovinos provenientes de um frigorífico com média de abate de 1200 cabeças de gado por mês e uma indústria de tinta de pequeno porte que fabrica tintas à base de água, à base de óleo e vernizes. Após as coletas as amostras foram caracterizadas no laboratório de Análises Ambientais da UFT, pelos parâmetros apresentados na Tabela 2. Para a análise elementar, foi separada uma alíquota de 10 ml das amostras, acidificadas com 5% de ácido nítrico *suprapur* e em seguida filtradas em membrana de 0,45µm. Após a leitura da curva padrão multielementar, a alíquota (acidificada e filtrada) foi analisada em equipamento de Emissão atômica de Plasma.

Tabela 2 - Caracterização físico-química e microbiológica dos efluentes.

Parâmetros	Efluente combinado (1:1)
pH	7,33±0,05
Temperatura (°C)	26±0,5
DQO (mg/L)	699±40
OD (mg/L)	5,28±0,5
Condutividade (µS/cm)	533,4±3,5
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	266,7±1,7
Turbidez (mg/L)	72±5
Nitrogênio total (mg/L)	1262±63
Sódio (mg/L)	28,04±0,63
Potássio (mg/L)	14,24±0,03
Magnésio (mg/L)	4,93±0,1
Cálcio (mg/L)	3,85±0,33
Molibdênio (mg/L)	ND
Fósforo (mg/L)	10,33±0,31
Zinco (mg/L)	0,12±0,00
Ferro (mg/L)	0,12±0,00
Cobre (mg/L)	0,2±0,00
Níquel (mg/L)	ND
Manganês (mg/L)	0,1±0,00

<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	900
Coliformes totais (UFC/100mL)	8000
Cobalto (mg/L)	ND
Lítio (mg/L)	ND
Sólidos totais (mg/L)	363

ND = não detectado.

Fonte: O autor (2025).

2.3 Preparação das amostras de capim Mombaça

2.3.1 Plantio

Para conduzir o estudo, optou-se pelo capim-mombaça como planta principal devido à sua necessidade maior de nutrientes, assim como a demanda por solo profundo, bom sistema de drenagem e adaptação ao clima local, que é caracterizado por altas temperaturas e mais de 1.000 mm de chuva por ano. O plantio do capim-mombaça foi realizado por meio de sementes, utilizando-se aproximadamente 30 sementes por vaso. Após 18 dias do plantio, realizou-se o desbaste, deixando-se 12 plantas em cada vaso. Os vasos foram organizados em fileiras com espaçamento de 1 metro entre si, enquanto a distância entre os vasos dentro de cada fileira foi de 0,5 m.

Implantou-se o experimento no delineamento experimental inteiramente casualizados, em esquema fatorial duplo 5x2, consistindo em diferentes tempos de coleta (T1 = 1 mês, T2 = 3 meses, T3 = 6 meses, T4 = 9 meses e T5 = 12 meses) com e sem aplicação do efluente combinado (1:1), com 5 repetições.

A exigência hídrica da cultura em todos os vasos foi calculada mediante a evapotranspiração diária de referência. A demanda hídrica da cultura em todas as parcelas foi calculada utilizando a evapotranspiração de referência diária (ET_0), utilizando o método Penman-Monteith $ET_0 \times K_c = ET_c$ (Allen, 2006). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada utilizando valores diários do coeficiente de cultura (K_c). Diariamente foram aplicadas lâminas acumuladas visando repor a ET_c .

2.3.2 Fertirrigação

Uma vez que as lâminas da combinação dos efluentes foram estabelecidas para aplicação nas parcelas experimentais, para o cálculo dessas lâminas utilizou-se como concentração referência o valor 60 kg.ha⁻¹ de nitrogênio. Determinou-se a lâmina de água e a fertirrigação com a pesagem dos vasos, observando que a diferença de pesos correspondia o

volume aplicado para elevar a capacidade de campo. A aplicação do efluente combinado foi feita utilizando-se de um regador manual, promovendo o contato com as folhas do capim, simulando a aplicação por meio de sistemas de aspersão. A primeira dose do efluente combinado foi aplicada 20 dias após o plantio do capim e as aplicações subsequentes foram feitas uma vez por semana.

2.3.3 Produtividade do capim Mombaça

Foram realizados cortes da gramínea aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após o transplante, com a colheita ocorrendo sempre no início da fase de florescimento, com a uma altura de 85 cm do solo. Após a coleta, o material vegetal foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por um período de 72 horas. Em seguida, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley para determinação do rendimento de matéria seca e posterior análise dos teores de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio), conforme metodologia descrita por Silva (2009).

2.3.4 Avaliação das propriedades químicas do solo

A investigação das possíveis alterações nos atributos químicos do solo foi realizada por meio de cinco coletas de amostras de solo coletadas na faixa de até 20 centímetros de profundidade em cada parcela experimental em intervalos de dois meses. Após retiradas, as amostras de solo foram encaminhadas ao laboratório e, seguindo a metodologia proposta pela Embrapa (2009), foram determinados o pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, capacidade de troca de cátions efetiva e potencial e saturação de bases.

Os dados dos atributos químicos do solo obtidos em cada unidade experimental foram analisados estatisticamente seguindo a metodologia apresentada por Ferreira (2018), em que os dados foram submetidos às análises de variância, regressão e teste de média. Em seguida, as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Dunnett e Tukey a 5% de probabilidade. Para a realização das análises estatísticas, foi utilizado o programa estatístico SISVAR[®] (Ferreira, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produtividade do capim Mombaça

A análise de variância indicou efeito significativo ($p < 0,01$) da aplicação combinada de efluentes oriundos da indústria de tintas e do abate de bovinos, via fertirrigação, sobre a

produtividade da forrageira. As diferenças entre os tratamentos, conforme os testes de comparação de médias, encontram-se detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativa de produtividade média do capim Mombaça em função da fertirrigação com efluente da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reúso agrícola.

	Produtividade Média (t ha ⁻¹)			
	Controle	Efluente combinado	Média ± DP	Média ± DP
1 mês	10,04a	7,2c	7,24±2,17	28,54
3 meses	1,98b	10,45b	5,72±3,87	70,07
6 meses	3,60b	10,07c	6,88±3,13	45,6
9 meses	5,06b	11,73b	6,55±2,66	47,23
12 meses	3,68b	15,08a	8,74±5,74	60,41

Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2025).

Conforme os dados apresentados na Tabela 3, verificou-se um incremento na produtividade do capim Mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) nos tratamentos submetidos à fertirrigação com efluente proveniente da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados durante 12 meses, quando comparados ao tratamento controle (sem aplicação de efluente). A produtividade média dos tratamentos fertirrigados foi de 15,08 t ha⁻¹ de matéria seca, superando em mais de 100% os 5,04 t ha⁻¹ observados no grupo controle. Esse desempenho produtivo reforça o potencial do efluente como fonte de nutrientes essenciais ao crescimento forrageiro, sobretudo nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), que são extraídos de forma contínua pelas plantas ao longo dos ciclos de corte.

Estudos de Oliveira et al. (2019) demonstraram que a aplicação de efluente de abatedouro, rica em matéria orgânica e compostos nitrogenados, favorece significativamente o acúmulo de biomassa em gramíneas tropicais, especialmente em cultivares de alta exigência nutricional, como o capim Mombaça. De maneira similar, Souza et al. (2020) observaram que a fertirrigação com efluente de origem animal e de efluentes ricos em carbonatos, proporcionam incrementos não apenas na produção de massa seca, mas também na concentração de nutrientes nos tecidos vegetais, evidenciando maior eficiência na absorção e aproveitamento dos elementos disponíveis no solo.

A dinâmica de extração de nutrientes pelo capim Mombaça ao longo dos 12 meses está diretamente associada ao crescimento vigoroso e à elevada taxa de rebrota característica da

espécie. Em ambientes com aporte regular de nutrientes, como nos tratamentos fertirrigados com efluente, a planta apresenta maior capacidade de absorver e redistribuir elementos essenciais, com destaque para o N e K, que são os mais demandados para a síntese proteica, formação de clorofila e regulação osmótica (SANTOS et al., 2021). Além disso, o fornecimento contínuo de fósforo contribui para o desenvolvimento do sistema radicular, ampliando a eficiência na captação de água e nutrientes, especialmente em colunas de solo com boa estrutura física.

Em escala internacional, Ramírez et al. (2020) demonstraram em experimentos conduzidos na Colômbia que a aplicação regular de efluentes de abatedouros bovinos em sistemas de produção de forragem pode aumentar a produtividade em até 120% quando comparado a áreas manejadas apenas com fertilizantes minerais, desde que haja controle sobre a carga orgânica e os níveis de salinidade do solo.

3.2 Extração de nutrientes pelo capim Mombaça

Foram calculadas as remoções médias de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), com base na produtividade e na concentração dos nutrientes na matéria seca da planta (Tabela 4).

Tabela 4 - Remoção média de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) pelo capim Mombaça em função da fertirrigação com efluente da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reúso agrícola.

Controle					
Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha⁻¹				
1 mês	35,72a	1,02a	3,42a	2,30a	0,83a
3 meses	31,48a	0,52a	3,20a	2,14a	0,78a
6 meses	30,73a	0,47a	2,78a	1,96a	0,72a
9 meses	30,62a	0,41a	2,53a	1,82a	0,67a
12 meses	29,79a	0,37a	1,83a	1,59a	0,56a
Média	31,67	0,56	2,75	1,96	0,71
CV (%)	25,43	48,05	11,24	19,52	8,6
Eluente combinado (1:1)					
Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha⁻¹				
1 mês	88,69b	2,25a	16,90a	23,43b	8,67b
3 meses	248,98a	2,44a	10,65a	18,35b	7,79b
6 meses	234,52a	5,25a	16,68a	17,18b	6,36b

9 meses	176,66ab	5,13a	12,70a	21,17b	7,83b
12 meses	216,55a	5,76a	15,93a	34,38a	12,72a
Média	193,56	3,73	14,57	31,38	8,47
CV (%)	18,56	52,12	30,26	16,01	30,1

Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2025).

Plantas irrigadas apenas com água (controle), observou-se uma redução geral na produtividade (Tabela 3) do capim Mombaça nos tratamentos submetidos à irrigação convencional contínua, o que resultou na ausência de diferenças estatísticas significativas na remoção de N, P, Ca e Mg entre os meses de coleta (Tabela 4).

Esse comportamento pode estar associado ao esgotamento parcial dos nutrientes disponíveis no solo ou à adaptação fisiológica da planta em estágios avançados do ciclo de cultivo, que tende a priorizar o acúmulo de biomassa estrutural em detrimento da absorção intensiva de macronutrientes. Trabalhos como os de Oliveira et al. (2019) e Ramírez et al. (2020) também identificaram estabilização ou decréscimo na extração de nutrientes por gramíneas tropicais sob irrigação prolongada, especialmente quando não há reposição adequada da solução nutritiva ou manejo criterioso da irrigação.

Por outro lado, os resultados do teste de comparação de médias evidenciaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) na extração de nitrogênio (N), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) pelo capim Mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) entre os diferentes tratamentos avaliados, conforme apresentado na Tabela 4. Os maiores valores de extração desses macronutrientes foram observados nos tratamentos com aplicação de efluente de abate de bovinos aos 3 e 12 meses de cultivo, superando significativamente os níveis registrados no tratamento controle (sem aplicação de efluente).

O maior acúmulo de N, Ca e Mg ao longo dos 12 meses pode ser atribuído à disponibilidade contínua desses elementos no solo promovida pela fertirrigação com efluente, que contém elevados teores de compostos nitrogenados, carbonatos e minerais oriundos de resíduos orgânicos e metabólitos do processamento animal e industrial. Estudos de Oliveira et al. (2019) e Souza et al. (2020) apontam que o efluente de abatedouro bovino é uma fonte rica e eficiente de nutrientes essenciais, favorecendo o crescimento da parte aérea e a eficiência na absorção de cátions bivalentes como Ca^{2+} e Mg^{2+} , fundamentais para a estabilidade das membranas celulares, atividade enzimática e divisão celular nas gramíneas tropicais.

A extração acentuada de nitrogênio, especialmente nos tratamentos iniciais (até 3 meses), está diretamente relacionada ao papel deste nutriente na formação de proteínas

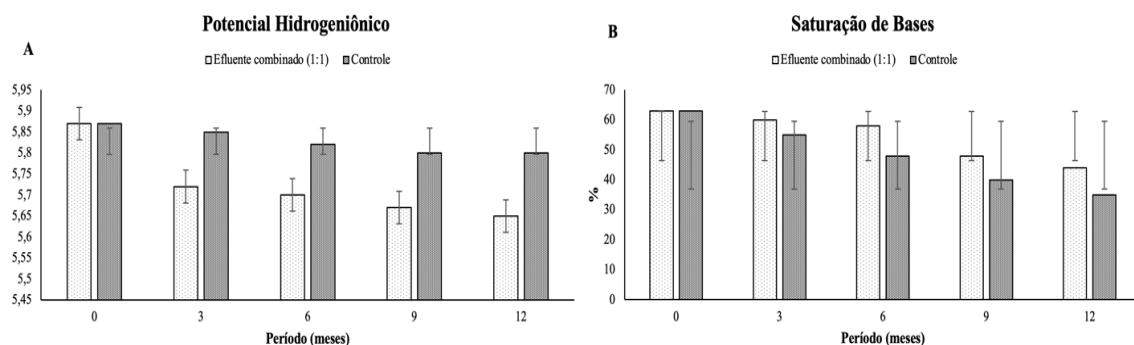
estruturais e no estímulo à brotação e perfilhamento, características que definem o vigor inicial do capim Mombaça. Já o maior acúmulo de Ca e Mg ao longo do ciclo de 12 meses está associado à necessidade contínua desses elementos na manutenção da integridade celular, no equilíbrio nutricional e na regulação do pH no apoplasto radicular, aspectos discutidos por Santos et al. (2021) em experimentos de longa duração com gramíneas sob diferentes regimes de fertirrigação.

Em estudo conduzido por Ramírez et al. (2020), observou-se comportamento semelhante na resposta de *Panicum maximum* submetido à aplicação contínua de efluente de abatedouro bovino, com elevação significativa na concentração de N, Ca e Mg nos tecidos vegetais em comparação aos fertilizantes minerais convencionais. Esses autores destacam ainda que, além do suprimento nutricional, o uso racional do efluente contribui para a melhoria das propriedades físico-químicas do solo, favorecendo a eficiência de absorção radicular.

3.3 Propriedades químicas do solo

Os fatores correspondentes ao uso do efluente combinado e os períodos de avaliações acarretaram alterações nos atributos químicos do solo, a Figura 1 apresenta as variações relativas ao pH e a saturação de bases.

Figura 1 – A) Níveis de potencial hidrogeniônico (pH) e B) saturação das bases (V%) do solo, em função da fertirrigação com efluente da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reúso agrícola.



Fonte: O autor (2025).

Na Figura 1, observa-se que ao longo dos 12 meses de cultivo sob aplicação contínua de efluentes combinados da indústria de tintas e de abate de bovinos (1:1), notou-se uma redução progressiva nos valores de pH e saturação por bases (V%) nos solos avaliados, tanto no grupo controle quanto nas parcelas tratadas com os efluentes. Esses resultados indicam um

possível efeito acidificante do manejo, mesmo com a expectativa de aumento da alcalinidade devido à presença de íons carbonato proveniente do efluente da indústria de tintas (Carlos et al., 2025).

A diminuição do pH do solo ao longo do tempo pode estar associada à mineralização da matéria orgânica presente nos efluentes, à oxidação de compostos nitrogenados, como a amônia, e à liberação de ácidos orgânicos, fenóis e outros resíduos químicos industriais residuais, especialmente no caso dos efluentes da indústria de tintas. De acordo com Huang et al. (2023), a aplicação de efluentes industriais pode promover acidificação do solo, principalmente quando o material apresenta compostos orgânicos com alta carga oxidável, afetando o equilíbrio ácido-base do sistema.

Do ponto de vista agrônômico, a redução da saturação por bases é preocupante, pois implica diminuição da disponibilidade de cátions essenciais (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+) na CTC (capacidade de troca catiônica) do solo. Tal condição pode comprometer a fertilidade e afetar negativamente o desenvolvimento das culturas. Silva et al. (2022) também relataram redução de V% em solos tratados com efluentes orgânicos de origem animal, sugerindo que a lixiviação de bases e a substituição por íons H^+ e Al^{3+} pode ocorrer com a intensificação das aplicações em sistemas contínuos.

Esse comportamento pode estar relacionado à elevada exigência nutricional da forrageira, especialmente em sistemas intensivos de produção. O capim Mombaça é conhecido por apresentar alto potencial produtivo, podendo acumular, por ciclo, aproximadamente 300 a 400 kg ha^{-1} de nitrogênio, 40 a 50 kg ha^{-1} de fósforo, e até 450 kg ha^{-1} de potássio, além de quantidades significativas de cálcio e magnésio, estimadas em 250 e 90 kg ha^{-1} , respectivamente, dependendo do manejo e das condições edafoclimáticas (Euclides et al., 2021; Werner et al., 2022).

Diante dessa alta demanda por nutrientes, a contribuição da aplicação de efluentes, especialmente nos primeiros anos de cultivo, pode não ser suficiente para promover alterações significativas nos teores disponíveis no solo, principalmente quando a taxa de aplicação é moderada. No entanto, há tendência de acúmulo gradual de alguns elementos com o uso contínuo, o que pode gerar efeitos mais expressivos no médio a longo prazo, especialmente se associado ao manejo adequado da adubação e à ciclagem eficiente de nutrientes.

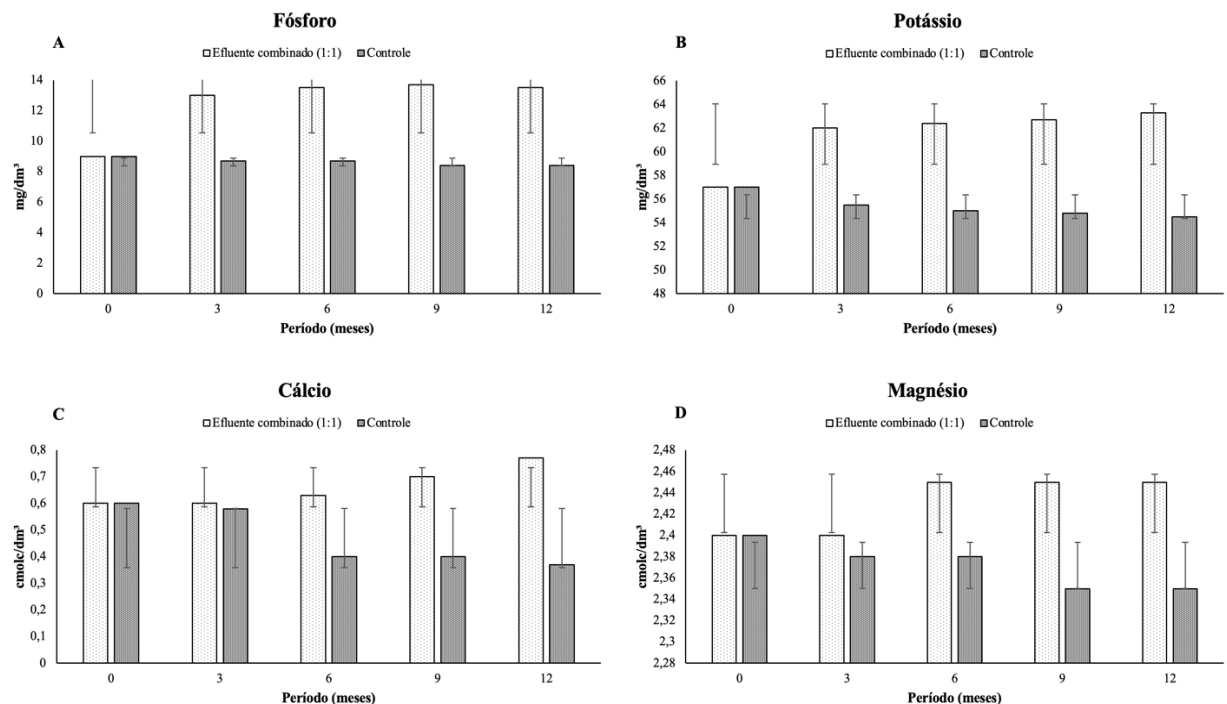
Por outro lado, alguns autores relataram manutenção ou até aumento dos valores de pH e saturação por bases em solos tratados com efluentes agroindustriais, principalmente quando os resíduos apresentavam elevada concentração de carbonatos ou óxidos metálicos. Rodrigues et al. (2021), por exemplo, observaram incremento no pH de solos arenosos tratados com

efluente de frigorífico, devido à presença de resíduos cálcicos e à alcalinidade do efluente. Essa divergência destaca a importância de caracterizar quimicamente os efluentes antes da aplicação e monitorar seus efeitos a longo prazo.

O comportamento acidificante observado no presente estudo sugere a necessidade de medidas corretivas no manejo, como a aplicação periódica de corretivos agrícolas (calcário) para neutralizar a acidez gerada, bem como ajustes na frequência e dose de aplicação dos efluentes. Além disso, a acidificação contínua pode aumentar a mobilidade de metais pesados no solo, o que requer atenção quanto à segurança ambiental do reúso agrícola.

A Figura 2 reporta os valores médios para a avaliação dos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ao longo de um ano de cultivo com capim Mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), sob diferentes condições de manejo, evidenciando distinções marcantes entre os tratamentos com e sem aplicação de efluentes combinados.

Figura 2 - Níveis de fósforo, potássio, cálcio e magnésio do solo, em função da fertirrigação com efluente da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reúso agrícola.



Fonte: O autor (2025).

Os gráficos 2A, 2B, 2C e 2D demonstram que, enquanto o grupo controle manteve valores relativamente constantes ou com pequenas oscilações decrescentes ao longo dos meses de avaliação, os tratamentos com aplicação combinada de efluentes da indústria de tintas e de

abate de bovinos apresentaram aumentos significativos nos teores desses nutrientes, com posterior estabilização ao longo do tempo.

O teor de fósforo disponível no solo aumentou consideravelmente nos tratamentos com efluente logo nos primeiros meses, mantendo-se em patamar estável nos meses subsequentes (Gráfico 2A). No grupo controle, por outro lado, o fósforo apresentou discreta redução, refletindo o efeito da extração pela cultura e a ausência de reposição. Esses resultados demonstram que a aplicação de efluentes foi eficiente em fornecer fósforo biodisponível ao solo, o que é particularmente relevante, visto que este nutriente possui baixa mobilidade e alta adsorção em solos tropicais, especialmente os ácidos, onde há maior fixação pelos óxidos de ferro e alumínio (Moreira; Siqueira, 2021).

A estabilidade dos teores ao longo do tempo nos solos com efluente também pode estar relacionada à mineralização gradual do fósforo orgânico presente no efluente bovino, que, segundo Lima et al. (2023), constitui uma fonte importante de fósforo de liberação lenta e contínua, contribuindo para suprir a demanda da planta mesmo sob intenso crescimento vegetativo. Ressalta-se que o capim Mombaça possui elevado índice de acúmulo de fósforo, especialmente nas fases iniciais de rebrota, o que reforça a importância da reposição contínua desse nutriente.

O potássio, nutriente essencial para a regulação osmótica, crescimento celular e ativação enzimática, apresentou comportamento semelhante ao fósforo: estabilidade no grupo controle com leve tendência de redução, e aumento substancial seguido de estabilização nos tratamentos com efluente (Gráfico 2B). Como o potássio é altamente solúvel e móvel no solo, sua dinâmica está intimamente relacionada à lixiviação e absorção pelas plantas.

Segundo Silva et al. (2022), os efluentes de abatedouros e frigoríficos geralmente contêm altos teores de K^+ solúvel, sendo prontamente disponíveis à planta. Esse efeito foi confirmado nos dados analisados, sugerindo que o sistema de fertirrigação com efluentes contribuiu para suprir adequadamente esse macronutriente. No entanto, a manutenção dos teores ao longo do tempo também indica que as doses aplicadas foram compatíveis com a demanda da cultura e que o sistema de retenção do solo foi eficiente para evitar perdas por lixiviação.

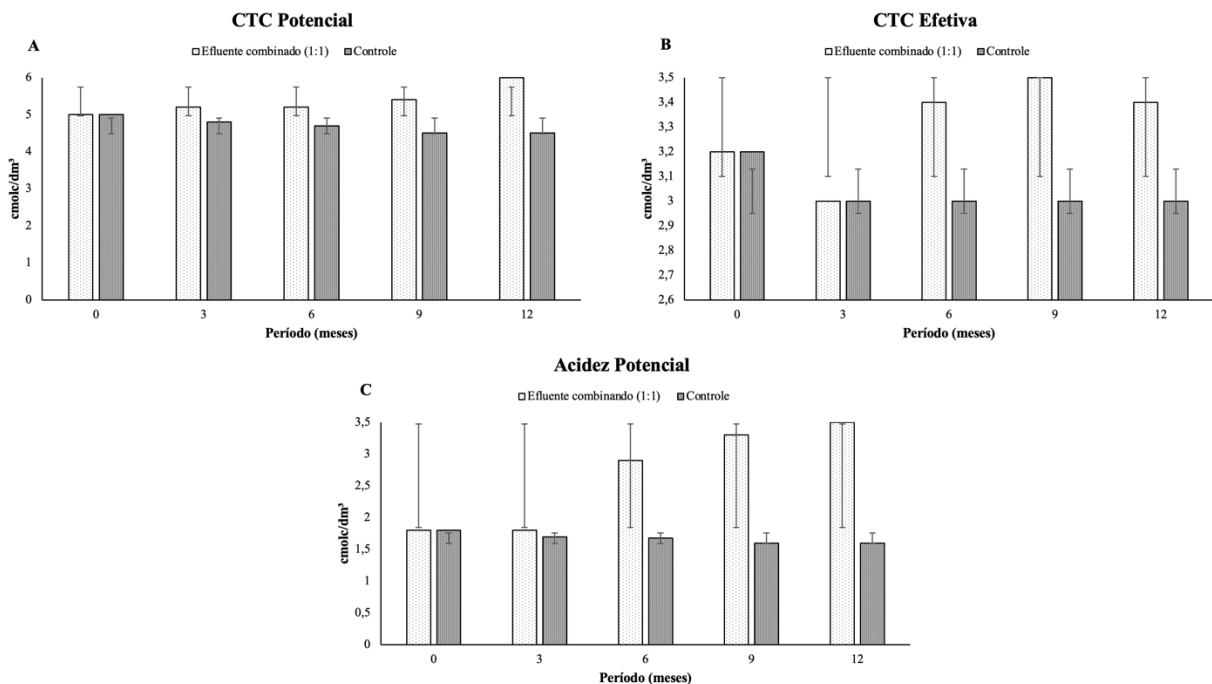
Os gráficos 2C e 2D evidenciam aumentos graduais nos teores de cálcio e magnésio no solo após a aplicação de efluentes, ao passo que o grupo controle mostrou discreta redução desses cátions ao longo do tempo. Ambos os nutrientes desempenham papéis cruciais na estrutura celular, integridade das membranas e funcionamento enzimático. O capim Mombaça

possui capacidade significativa de extração de Ca e Mg, como já apontado por Euclides et al. (2021), especialmente em sistemas de manejo intensivo e sob altas taxas de crescimento.

A origem dos cátions básicos no solo tratado pode ser explicada pela natureza dos efluentes aplicados. De acordo com Zhao et al. (2021), efluentes industriais combinados, sobretudo os que contêm resíduos orgânicos e agentes neutralizantes, frequentemente apresentam elevada carga de bases trocáveis, o que justifica o aumento desses elementos. Além disso, o equilíbrio entre Ca^{2+} e Mg^{2+} é crucial para evitar antagonismos na absorção pelas raízes, o que parece ter sido mantido nos tratamentos, dado o comportamento semelhante entre os dois nutrientes.

As Figuras 3A, 3B e 3C apresentam a evolução da capacidade de troca catiônica potencial (CTCp), efetiva (CTCe) e da acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) ao longo de um ano de cultivo com capim Mombaça.

Figura 3 - Níveis de CTC potencial, CTC efetiva e acidez potencial do solo, em função da fertirrigação com efluente da indústria de tintas e de abate de bovinos combinados para reuso agrícola.



Fonte: O autor (2025).

Observou-se um aumento linear significativo da CTC potencial e da acidez potencial ao longo do período de cultivo. A CTC efetiva, embora também apresentasse tendência crescente, não demonstrou diferença estatística significativa entre os períodos avaliados.

O comportamento crescente da CTCp ao longo do tempo pode ser atribuído, principalmente, à elevação dos teores de matéria orgânica e ao aporte de cátions básicos oriundos dos efluentes aplicados. A matéria orgânica, especialmente na forma de resíduos orgânicos de origem bovina, apresenta alto número de sítios ativos com capacidade de adsorção e troca de cátions, contribuindo diretamente para o aumento da CTC (Costa et al., 2023). Além disso, o aporte de compostos orgânicos complexos presentes nos efluentes industriais, como polifosfatos e ácidos húmicos sintéticos oriundos do tratamento de superfícies metálicas na indústria de tintas, também pode promover melhorias na atividade coloidal do solo, como discutido por Zhang et al. (2022), resultando em maior CTCp.

Já a CTC efetiva, apesar de apresentar aumento ao longo do tempo, não demonstrou variações estatisticamente significativas. Isso pode ser explicado pelo equilíbrio dinâmico entre os cátions trocáveis na fase sólida e os íons em solução, especialmente considerando o regime de extração de nutrientes imposto pela cultura do capim Mombaça. Como discutido anteriormente, a elevada exigência nutricional dessa gramínea forrageira implica em alta taxa de absorção de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , o que pode atenuar os efeitos positivos da adição de cátions via efluente na CTCe (Euclides et al., 2021). A manutenção de níveis estáveis de CTCe, apesar da alta absorção, sugere um bom balanço entre fornecimento e demanda nutricional no sistema.

A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) também apresentou aumento linear com o tempo nos tratamentos com efluentes, indicando que, embora haja aporte significativo de bases, há simultaneamente o acúmulo de prótons e alumínio trocável no complexo sortivo. Isso pode estar relacionado à mineralização de compostos orgânicos presentes nos efluentes, especialmente aqueles oriundos da indústria de tintas, que podem liberar ácidos orgânicos de cadeia curta durante a decomposição (Zhou et al., 2021). Além disso, resíduos de corantes, pigmentos e cargas inorgânicas que não foram totalmente degradados podem interferir no equilíbrio ácido-base do solo, promovendo, em alguns casos, aumento da acidez latente.

Esse comportamento é coerente com a tendência observada de leve redução no pH e da saturação por bases nos meses finais do experimento, sugerindo uma possível acidificação lenta e cumulativa do solo, possivelmente em razão da oxidação de compostos orgânicos e da liberação de íons H^+ durante os processos de nitrificação e degradação da matéria orgânica. Segundo Lima et al. (2023), o uso prolongado de efluentes orgânicos e industriais pode induzir efeitos contrastantes: enquanto promove o aporte de nutrientes e eleva a CTC, também pode, em longo prazo, acidificar o solo, exigindo manejo corretivo.

No contexto agrônomo, o aumento da CTCp é um indicativo positivo de melhoria da capacidade de retenção de nutrientes pelo solo, o que favorece sistemas intensivos como o de

produção de forragem. No entanto, o aumento da acidez potencial associado à estabilidade da CTCe aponta para a necessidade de monitoramento constante e da eventual aplicação de corretivos de acidez (como calcário dolomítico), de modo a evitar a saturação por alumínio e a redução da disponibilidade de nutrientes, sobretudo fósforo, cuja adsorção é intensificada em ambientes ácidos.

4 CONCLUSÕES

A fertirrigação com efluente combinado promoveu aumento expressivo na produtividade do capim Mombaça, alcançando média de 15,08 t ha⁻¹ de matéria seca. Observou-se maior extração de nitrogênio, cálcio e magnésio ao longo dos 12 meses, refletindo a eficiência nutricional dos tratamentos.

O reúso agrícola de efluentes da indústria de tintas e de abate de bovinos promoveu o aumento e a estabilização dos teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio no solo, mesmo com a extração intensa pelo capim Mombaça.

Houve incremento da CTC potencial, indicando melhora na capacidade de retenção de nutrientes. No entanto, também se observou aumento da acidez potencial e leve redução do pH e da saturação por bases ao longo do tempo.

Esses resultados mostram o potencial do reúso como alternativa sustentável, mas reforçam a necessidade de monitoramento e manejo da acidez do solo.

A complementaridade nutricional entre os efluentes do abate de bovinos e da indústria de tintas explica a eficiência agrônômica observada. Esses resultados comprovam o potencial da mistura como fonte sustentável de nutrientes para fertirrigação.

Estudos futuros devem avaliar efeitos de longo prazo, diferentes solos e culturas, além de investigar o comportamento de possíveis contaminantes para garantir segurança agrônômica e ambiental.

REFERÊNCIAS

CARLOS, T. D.; SILVA BARBOSA, R.; PALLINI, A.; CAVALLINI, G. S.; SARMENTO, R. A. Ecotoxicological Evaluation of Paint Industrial Effluent Post-Treated with Fenton-Type Coagulation. **Water Air Soil Pollution**, 236, 2, 2025. DOI: [10.1007/s11270-024-07620-5](https://doi.org/10.1007/s11270-024-07620-5)

COSTA, L. A.; FERREIRA, R. P.; SANTOS, E. B. Influência da matéria orgânica na CTC de solos sob adubação com efluentes agroindustriais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0220024, 2023. DOI: [10.1590/18069657rbc20220024](https://doi.org/10.1590/18069657rbc20220024).

COSTA, L. R. et al. Avaliação ecotoxicológica dos efluentes gerados pela indústria de tintas e de abates de bovinos combinados visando reuso agrícola. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, [S. l.], v. 11, n. 3, 2024. DOI: [10.20873/2024_v3_4](https://doi.org/10.20873/2024_v3_4).

EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; VALLE, C. B. do. Manejo de cultivares de *Panicum maximum* em pastagens tropicais. Campo Grande, MS: **Embrapa Gado de Corte**, 2021. DOI: [10.34188/9786586963155](https://doi.org/10.34188/9786586963155).

EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; VALLE, C. B. do. Manejo de cultivares de *Panicum maximum* em pastagens tropicais. Campo Grande, MS: **Embrapa Gado de Corte**, 2021. DOI: [10.34188/9786586963155](https://doi.org/10.34188/9786586963155).

FAO. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point**. Rome: FAO, 2022. DOI: [10.4060/cb9910en](https://doi.org/10.4060/cb9910en)

HUANG, J. et al. Impact of industrial wastewater reuse on soil acidity and nutrient cycling in agricultural fields. **Journal of Environmental Management**, 332, 117356, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117356>

KIZILOĞLU, F. M. et al. Effects of wastewater irrigation on soil and wheat (*Triticum aestivum* L.) yield. **Agricultural Water Management**, v. 243, 2020. DOI: [10.1016/j.agwat.2020.106432](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106432)

LIMA, A. A. et al. Atributos químicos do solo sob fertirrigação com efluentes agroindustriais tratados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, 2023. DOI: [10.36783/18069657rbc20220052](https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220052)

LIMA, R. A.; MEDEIROS, E. P.; FERREIRA, T. O. Resposta de atributos químicos do solo à aplicação de efluente agroindustrial em pastagens tropicais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 29–35, 2023. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v27n1p29-35](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n1p29-35).

MELO, C. A. et al. Impactos da aplicação de efluentes na qualidade do solo e produtividade forrageira. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 2, p. 195–202, 2021. DOI: [10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n2p195-202/2021](https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n2p195-202/2021)

MESQUITA, E. F. M. et al. Capim-mombaça submetido a diferentes lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Revista Agro@ambiente**, v. 16, e7055, 2022. DOI: [10.5327/Z1415-4366202217055](https://doi.org/10.5327/Z1415-4366202217055)

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 3. ed. Lavras: UFLA, 2021.

NASCIMENTO, M. O. et al. Qualidade química de solo sob aplicação de águas residuárias industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 166–172, 2022. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v26n3p166-172](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n3p166-172).

OLIVEIRA, T. S.; LIMA, F. C.; FERREIRA, D. A. Efeito da aplicação de efluente de abatedouro de bovinos sobre o crescimento e produção de capim Mombaça. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 23, n. 2, p. 105–111, 2019.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2011.

RAMÍREZ, J. F.; GONZÁLEZ, D. C.; TORO, A. M. Use of slaughterhouse effluents in the fertigation of tropical pastures: effects on yield and soil chemical properties. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 239, p. 106265, 2020.

RODRIGUES, C. A.; MARTINS, D. A.; OLIVEIRA, P. R. Chemical amendments and effluent irrigation: Effects on soil fertility and environmental safety. **Soil and Tillage Research**, 208, 104864, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104864>

RODRIGUES, C. A.; MOREIRA, J. P.; MORAIS, R. F. Efeitos agronômicos e ambientais do uso contínuo de efluentes industriais em solos tropicais. **Revista Ambiente & Água**, v. 17, n. 2, p. 1–12, 2022. DOI: [10.4136/ambi-agua.2789](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2789).

RODRIGUES, C. A.; MOREIRA, J. P.; MORAIS, R. F. Efeitos agronômicos e ambientais do uso contínuo de efluentes industriais em solos tropicais. **Revista Ambiente & Água**, v. 17, n. 2, p. 1–12, 2022. DOI: [10.4136/ambi-agua.2789](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2789).

SANTOS, J. P. et al. Potencial do uso agrícola de efluentes tratados: revisão dos riscos e benefícios. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 40, 2023. DOI: [10.35977/0104-1096.cct2023.v40.41850](https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2023.v40.41850)

SANTOS, M. V.; MEDEIROS, E. P.; ARAÚJO, J. R. Extração de nutrientes e acúmulo de biomassa por capim Mombaça submetido à fertirrigação com resíduos líquidos. **Cadernos de Agroecologia**, v. 16, n. 3, p. 1–12, 2021.

SILVA, L. R.; ANDRADE, M. F.; FARIA, A. M. Long-term effects of livestock effluent on soil fertility indicators in tropical agricultural systems. **Agricultural Water Management**, 272, 107807, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107807>

SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C.; SANTOS, R. S. Efluentes de frigorífico como fonte de nutrientes para a agricultura: avaliação agronômica e ambiental. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 7, n. 3, p. 53–60, 2022. DOI: [10.24221/jeap.7.3.2022.3793.53-60](https://doi.org/10.24221/jeap.7.3.2022.3793.53-60).

SOUZA, A. M. et al. Aplicação de efluentes na agricultura: impactos sobre atributos químicos e salinidade do solo. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 44, e33349, 2023. DOI: [10.25066/agrotec.v44i1.33349](https://doi.org/10.25066/agrotec.v44i1.33349)

SOUZA, A. L.; SANTOS, H. G.; CORRÊA, R. M. Influência do efluente de abatedouro na composição química e produtividade de forrageiras tropicais. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 19, n. 1, p. 41–49, 2020.

WANG, Y. et al. Effects of long-term industrial wastewater irrigation on soil chemical properties and microbial communities. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 193, 2020. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.110323](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110323)

WERNER, J. C.; ASSMANN, T. S.; FRANCHINI, J. C. Demanda nutricional de forrageiras tropicais: implicações para o manejo sustentável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0220023, 2022. DOI: [10.36783/18069657rbc20220023](https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220023).

YANG, C. et al. Soil fertility and heavy metal accumulation under long-term irrigation with treated wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 776, 2021. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.145988](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145988)

ZHANG, W.; ZHAO, Y.; LI, L. Impacts of synthetic organic amendments from industrial effluents on soil CEC and nutrient dynamics. **Journal of Environmental Management**, v. 308, 114615, 2022. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.114615](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114615).

ZHAO, Y.; WANG, J.; LI, H. Agricultural reuse of combined industrial wastewater: impacts on soil nutrients and crop yield. **Environmental Pollution**, v. 273, 116492, 2021. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.116492](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116492).

ZHOU, J.; LI, X.; YANG, Y. Role of organic acids from industrial wastewater in aluminum mobilization and soil acidification. **Environmental Research**, v. 194, 110663, 2021. DOI: [10.1016/j.envres.2020.110663](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110663).