UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Tecno-solo construído com subproduto do beneficiamento da bauxita e aglomerante orgânico: produtividade vegetal da *Urochloa decumbens* e balanço de carbono

Maria Carolina da Silva Vieira
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025

MARIA CAROLINA DA SILVA VIEIRA

Tecno-solo construído com subproduto do beneficiamento da bauxita e aglomerante orgânico: produtividade vegetal da *Urochloa decumbens* e balanço de carbono

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Emanuelle M. Barros Soares

Coorientador: Ivo Ribeiro da Silva

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T
V658t
2025

Vieira, Maria Carolina da Silva, 1999-
Tecno-solo construído com subproduto do beneficiamento da bauxita e aglomerante orgânico: produtividade vegetal da *Urochloa decumbens* e balanço de carbono / Maria Carolina da Silva Vieira. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (82 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.
Orientador: Emanuelle Mercês Barros Soares.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 2025.
Referências bibliográficas: f. 71-78.
DOI: https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.752
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Teor de compostos orgânicos. 2. Solos argilosos. 3. Recuperação ecológica. 4. Bauxita - Minas e mineração - Eliminação de resíduos. 5. Barragens de rejeitos. 6. Braquiaria decumbens - Silagem. I. Soares, Emanuelle Mercês, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.417

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

MARIA CAROLINA DA SILVA VIEIRA

Tecno-solo construído com subproduto do beneficiamento da bauxita e aglomerante orgânico: produtividade vegetal da *Urochloa decumbens* e balanço de carbono

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 6 de agosto de 2025.

Assentimento:

_____

Maria Carolina da Silva Vieira
Autora

_____

Emanuelle Merces Barros Soares
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 13/11/2025 às 08:39:46 e pela orientadora em 13/11/2025 às 08:57:24. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse https://siadoc.ufv.br/validar-documento. No campo 'Código de registro', informe o código **GVXA.GCT1.G7V3** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

A Deus, por me guiar até aqui, concedendo-me força, sabedoria e coragem para enfrentar cada desafio ao longo desta trajetória.

À minha família, por todo o amor, apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa - UFV, ao Departamento de Solos e ao Grupo de Estudos de Matéria Orgânica do Solo e Rizosfera – RIZOMOS, pelo espaço físico disponibilizado, pelas oportunidades de aprendizado e pelo ambiente de crescimento pessoal e profissional proporcionado.

Ao Laboratório de Isótopos Estáveis e a todas as pessoas que nele trabalham com tanta dedicação e entusiasmo, pela convivência, colaboração e pelos valiosos ensinamentos compartilhados.

À Professora Emanuelle Mercês Barros Soares, ao Professor Ivo Ribeiro da Silva e ao Professor Rafael da Silva Teixeira, pela orientação, confiança depositada e pelos ensinamentos que contribuíram significativamente para o meu desenvolvimento acadêmico.

À Companhia Brasileira de Alumínio - CBA, pelo financiamento do projeto, pela disponibilidade em oferecer apoio operacional e pela disponibilização dos materiais utilizados neste estudo.

Aos técnicos João Milagres e Humberto Rosado, pela paciência, prontidão e fundamental suporte técnico ao longo das atividades.

Aos estagiários Ana Paula, Arthur, David, Gabriela, João Pedro, Luan, Nataly e Sofia, pela colaboração, pela ajuda nas etapas práticas e pelo bom humor que tornava mais leves os momentos de dificuldade.

Ao João, meu companheiro de vida, por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio em todos os momentos deste percurso.

À Maria, Daniela e Jônatas, pela disponibilidade e por sempre se colocarem prontos a ajudar quando precisei.

E, por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que esta caminhada fosse possível, meu sincero agradecimento.

RESUMO

VIEIRA, Maria Carolina da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Tecno-solo construído com subproduto do beneficiamento da bauxita e aglomerante orgânico: produtividade vegetal da *Urochloa decumbens* e balanço de carbono**. Orientadora: Emanuelle Merces Barros Soares. Coorientador: Ivo Ribeiro da Silva.

O beneficiamento da bauxita - minério de alumínio - gera um subproduto com baixa concentração de sólidos, tradicionalmente destinado a barragens de rejeito, estruturas associadas a elevado risco de rompimento. Como alternativa, processos de desaguamento têm sido utilizados para obtenção de um subproduto sólido, denominado "torta de argila". Esse material é acrescido de resíduos orgânicos e recoberto com o *topsoil* decapeado da área pré-lavra, criando um solo artificial (tecno-solo) acima do estéril de fundo de mina. Apesar de aplicável na recuperação de áreas degradadas pela mineração, esse solo construído apresenta limitações físicas, químicas e biológicas, demandando estratégias para recuperar suas funcionalidades ecossistêmicas. A adição de resíduos orgânicos tem o objetivo de mitigar tais limitações, especialmente por meio do aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS), enquanto o uso do *topsoil* contribui com a reintrodução da biodiversidade nativa. O objetivo do estudo é avaliar o potencial do tecno-solo construído com torta de argila acrescida de diferentes porcentagens de cama de aviário, quanto à produtividade da *Urochloa decumbens* e ao balanço de carbono do sistema, em condições de campo, em área minerada em processo de reabilitação. O experimento foi conduzido em blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos consistiram em parcelas contendo o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) (T1) e tecno-solo construído com *topsoil* + torta de argila com adubação mineral + doses crescentes de cama de aviário (T2: 0, T3: 30, T4: 90 e T5: 160 g kg^{-1}). Foi cultivada a *U. decumbens*. A avaliação do desempenho produtivo do tecno-solo e do balanço de C compreendeu: (i) a quantificação dos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) nas frações MOP e MOAM da MOS; (ii) a determinação dos estoques de C e N na massa de matéria seca de parte aérea e raiz da *U. decumbens*; (iii) a mensuração acumulada das emissões de CO_2, CH_4 e N_2O; e (iv) a análise dos estoques de C e N nos lixiviados gerados. A partir disso, foi calculado o balanço de C do sistema em razão da dose de máxima eficiência econômica para a produção de *m*MS_PA. Essa dose ótima foi de 21,7 g kg^{-1} de cama de aviário, resultando em saldo positivo de 179,08 Mg ha^{-1} no balanço de carbono do sistema.

Palavras-chave: matéria orgânica do solo; recuperação de área mineradas; equilíbrio ecossistêmico; cama de aviário

ABSTRACT

VIEIRA, Maria Carolina da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025. **Techno-soil constructed with bauxite beneficiation byproduct and organic binder: plant productivity of Urochloa decumbens and carbon balance**. Adviser: Emanuelle Merces Barros Soares. Co-adviser: Ivo Ribeiro da Silva.

Bauxite processing—used to extract aluminum—generates a by-product with low solid content, traditionally stored in tailings dams, which are associated with high environmental and structural risks. As an alternative, dewatering processes have been employed to obtain a solid byproduct (RCO). This material is amended with organic residues and covered with the stripped topsoil from the pre-mining area, creating an artificial soil (tecno-soil) over the mine's overburden. Although applicable for rehabilitating areas degraded by mining, such constructed soils exhibit physical, chemical, and biological limitations that demand strategies to restore their ecosystem functions. The addition of organic waste aims to mitigate these limitations, particularly by increasing soil organic matter (SOM) content, while the use of topsoil helps reintroduce native biodiversity. This study aimed to evaluate the potential of a technosol constructed with RCO amended with different rates of poultry litter in terms of Urochloa decumbens productivity and the system's carbon balance, under field conditions in a mined area under rehabilitation. The experiment followed a randomized block design with three replications. Treatments included: the current standard recovery practice (topsoil + overburden) (T1), and tecno-soil constructed with topsoil + RCO with mineral fertilization + increasing poultry litter doses (T2: 0, T3: 30, T4: 90 e T5: 160 g kg^{-1}). *Urochloa decumbens* was cultivated. The evaluation of tecno-soil performance and system carbon balance included: (i) quantification of carbon (C) and nitrogen (N) stocks in the particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) SOM fractions; (ii) determination of C and N stocks in aboveground and root dry matter biomass; (iii) cumulative measurement of CO_2, CH_4, and N_2O emissions; and (iv) analysis of C and N stocks in leachates. From these data, the system's carbon balance was calculated based on the economically optimal poultry litter application rate for aboveground dry matter yield. The optimal dose was 21,7 g kg^{-1} of poultry litter, resulting in a positive carbon balance of 179.08 Mg ha^{-1}.

Keywords: soil organic matter; mined land reclamation; ecosystem balance; poultry litter

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9
3. OBJETIVO GERAL 11
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
5. MATERIAIS E MÉTODOS 12
5.1. Localização e caracterização da área experimental 12
5.2. Metodologia 13
5.3. Instalação e condução do experimento 14
5.4. Caracterização do subproduto do beneficiamento da bauxita (“torta de argila”) 18
5.4.1. Análise física da “torta de argila” 18
5.4.2. Análise química da “torta de argila” 19
5.5. Caracterização do *topsoil* 20
5.5.1. Análise química do *topsoil* 20
5.6. Caracterização da cama de aviário 21
5.6.1. Análise química da cama de aviário 21
5.7. Fracionamento da MOS 22
5.8. Estoque de C e N nas frações da MOS 22
5.8.1. Teor de carbono orgânico total e nitrogênio total 22
5.8.2. Teor de carbono lábil 22
5.8.3. Cálculo do estoque dos nutrientes 23
5.8.4. Grau de saturação e déficit de saturação de carbono do solo 23
5.9. Biomassa vegetal 24
5.9.1. Massa de matéria seca de parte aérea 24
5.9.2. Dose de máxima eficiência econômica 24
5.9.3. Massa de matéria seca de raiz 25
5.9.4. Teor de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de parte aérea e raiz 25
5.9.5. Estoque de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de parte aérea e raiz 25
5.10. Gases de efeito estufa 26
5.10.1. Concentração dos gases de efeito estufa em profundidade 27
5.10.2. Fluxo dos gases de efeito estufa 27
5.10.3. Emissão acumulada dos gases de efeito estufa 27

5.13. Lixiviado....28
5.13.1. Teor de amônio....29
5.13.2. Teor de nitrato....29
5.13.3. Teor de fósforo inorgânico....29
5.13.4. Teor de carbono e nitrogênio....30
5.13.5. Total de C, N, N-NH_4^+, N-NO_3^- e P lixiviado....30
5.14. Balanço de carbono....30
5.15. Análises estatísticas....31
6. RESULTADOS....32
6.1. Estoque de carbono orgânico e nitrogênio total e carbono lábil nas frações da matéria orgânica do solo....32
6.2. Dose de máxima eficiência econômica para a produção de massa de matéria seca de parte aérea da braquiária....41
6.3. Estoque de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca da parte aérea da braquiária....44
6.4. Produção de massa de matéria seca de raiz da braquiária....46
6.5. Estoque de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de raiz da braquiária....48
6.6. Concentração dos gases de efeito estufa no solo em profundidade....50
6.7. Fluxo de gases de efeito estufa (CO_2, CH_4, N_2O) e acumulado....51
6.8. Teores de nitrato, amônio, fósforo inorgânico e carbono no lixiviado....54
6.9. Balanço de carbono do sistema....58
7. DISCUSSÃO....59
7.1. Dinâmica do carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica do solo....59
7.2. Resposta produtiva da *Urochloa decumbens* e distribuição da biomassa....62
7.3. Emissões de gases de efeito estufa e implicações ambientais....64
7.4. Perdas de nutrientes por lixiviação e qualidade da água....66
7.5. Balanço de carbono e perspectivas para tecno-solos....68
8. CONCLUSÕES....70
REFERÊNCIAS....71

1. INTRODUÇÃO

O alumínio, metal frequentemente presente em nosso cotidiano, é obtido por meio do processamento da bauxita (minério de alumínio). O Brasil ocupa o terceiro lugar no ranking mundial tanto em reservas quanto em produção deste minério, com destaque para os estados do Pará e Minas Gerais (ABAL, 2017). A bauxita brasileira é considerada de ótima qualidade para fins metalúrgicos (MÁRTIREZ, 2000).

Nacionalmente, a cadeia produtiva da bauxita contribui com R$ 2,59 bilhões no faturamento do setor mineral, além de gerar empregos diretos e indiretos (IBRAM, 2024). Além de sua importância econômica, o metal resultante de seu processamento é utilizado em vários setores industriais e na produção de diversos produtos, em razão de sua versatilidade (ABAL, 2017).

Antes de ser destinada à refinaria, a bauxita extraída precisa passar por um processo de beneficiamento, já que nem todo material extraído é minério útil. O objetivo do beneficiamento é aumentar a qualidade do minério e reduzir os custos e emissões de gases de efeito estufa (GEEs) associados ao transporte. Esse processo inclui a britagem, que reduz e homogeneíza o tamanho das partículas do material, e a lavagem, que remove argilominerais e ultrafinos associados (PAZ, 2016; ABAL, 2017).

A concentração da bauxita por meio do beneficiamento resulta em um subproduto de baixa concentração de sólidos, composto por argilominerais (silicatos, óxidos de ferro e óxidos de alumínio) dispersos em água. Atualmente, esse material é destinado às barragens, onde se torna rejeito. No entanto, os riscos de rompimento dessas estruturas e seu potencial causador de danos sociais, ambientais e econômicos têm motivado a pesquisa de métodos alternativos para a utilização e disposição do subproduto, eliminando a necessidade de barragens.

Uma solução adotada pelas indústrias de mineração é a secagem do subproduto e seu empilhamento a seco. Entretanto, esse método apresenta limitações, principalmente devido à erosão das pilhas de material, causada pela ação das chuvas (PARREIRAS, 2022a; PARREIRAS, 2022b). A preocupação com as falhas nesse método de disposição aumenta diante dos regimes de chuva cada vez mais inconsistentes, com a ocorrência de chuvas fortes e concentradas.

Para encontrar uma solução economicamente viável, ambientalmente correta e socialmente aceitável para essa questão na produção, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), terceira maior empresa de mineração de bauxita no Brasil, em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (UFV), idealizou a construção de tecno-solos a partir do subproduto gerado.

Por meio de uma planta móvel o subproduto é desaguado por centrifugação, possibilitando a recuperação da água de lavagem e resultando em sólidos secos, material chamado de "torta de argila". A tecnologia TECNO-SOLO consiste em recobrir o estéril de fundo de mina, em áreas pós-lavra, com a torta de argila acrescida de aglomerantes orgânicos, além da camada de *topsoil* distribuída superficialmente. Este processo cria um solo artificial, composto por artefatos fortemente alterados pelo homem, que pode ser classificado como Tecnossolo de acordo com a WRBSR-FAO, nomenclatura que inspirou o nome da tecnologia (WRB-FAO, 2015).

A torta de argila apresenta características químicas, físicas e biológicas desfavoráveis para a criação de um solo produtivo. Dentre elas podemos citar sua natureza constituída em grande parte por argilominerais fortemente intemperizados de caráter distrófico, a dispersão de suas partículas e presença de pseudoagregados frágeis, os baixos teores de matéria orgânica e a reduzida diversidade macro e microbiológica. Parte desses problemas são causados pelos processos de beneficiamento aos quais o material foi submetido. A partir disso, é necessário fazer uso de estratégias para contornar tais fatores limitantes, possibilitando o cultivo de espécies vegetais.

O *topsoil* acrescido ao tecno-solo é o solo superficial, referente ao horizonte A e B, que é decapeado na etapa de supressão vegetal e armazenado nas bordas da área de mineração com o intuito de ser redistribuído na área pós-lavra. Este material contém um alto teor de matéria orgânica e um banco de sementes e microbiota da área pré-mineração, tornando sua utilização uma alternativa para proporcionar a inoculação da biodiversidade nativa da área original (AMARAL, 2013; MARTINS, 2019).

A adição de aglomerantes orgânicos juntamente à torta de argila tem o papel de condicionar o solo construído. A decomposição da matéria orgânica gera agentes cimentantes que favorecem a reagregação das partículas dispersas, formando uma macroestrutura que favorece a infiltração de água e aeração do solo (JANGORZO et al, 2008; CASTRO FILHO et al., 1998). O material possibilita o aporte de carbono, o

que estimula a microbiota do solo e favorece o aumento de sua diversidade e sua atuação em diversos ciclos importantes do sistema, como a ciclagem de nutrientes, aumentando a disponibilidade de nutrientes e o sequestro de carbono no solo (CARNEIRO et al, 2008, RUIZ, 2019, REES et al., 2019).

A partir do momento em que as propriedades do solo são favorecidas, há diminuição da limitação para o crescimento de plantas. Isto se faz muito importante, visto que o estabelecimento de plantas capazes de fornecer quantidades significativas de biomassa da parte aérea, radicular e rizodeposições, vão atuar no incremento contínuo de materiais orgânicos, como também na formação de agregados, pelo enlace e contenção física das partículas pelas raízes e bioporos, decorrente do crescimento e morte das raízes (JANGORZO et al, 2008; RUIZ, 2019).

Essa é uma medida inicial para restaurar a saúde do solo e promover o equilíbrio ecossistêmico, garantindo a recuperação ambiental da área degradada pela atividade de mineração, conforme exigido pelo Decreto nº 97.632/89 (BRASIL,1989; SÁNCHEZ, 2010). Além de permitir o retorno da provisão de serviços ecossistêmicos e funções fornecidas pelo solo, bem como o usufruto de seus serviços ambientais, os quais são fundamentais para a vida terrestre (PARRON et al., 2015).

Portanto, o desenvolvimento e emprego desta tecnologia pode viabilizar ao setor minerário uma estratégia para garantir o desenvolvimento sustentável de sua cadeia produtiva. Impulsionado pela necessidade de mitigação das mudanças climáticas. Tal medida se enquadra nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de número 12, 13 e 15, que visam assegurar o padrão de produção e consumo sustentável, implementar medidas para combater as mudanças climáticas e seus impactos e garantir o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, respectivamente (ONU, 2018).

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial do tecno-solo construído com torta de argila acrescida de diferentes porcentagens de cama de aviário, quanto à produtividade da braquiária decumbens (*Urochloa decumbens*) e ao balanço de carbono do sistema, em condições de campo, em área minerada em processo de reabilitação.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir a melhor porcentagem de cama de aviário a ser misturada com a torta de argila para a construção do tecno-solo, em condições de campo;

Avaliar o potencial produtivo de massa de matéria seca de parte aérea e raiz da braquiária decumbens (*U. decumbens*);

Avaliar o potencial de eutrofização/contaminação da água de infiltração por nitrato, amônio e fósforo inorgânico;

Avaliar o potencial estoque de carbono e nitrogênio pelas frações persistentes da MOS;

Quantificar a emissão de gases de efeito estufa: CO_2, CH_4 e N_2O;

Estimar o balanço de carbono no sistema em relação às entradas: cama de aviário acrescida à torta de argila e biomassa vegetal de parte aérea e raízes; e saídas: emissão de GEEs e fração de carbono lábil da MOS.

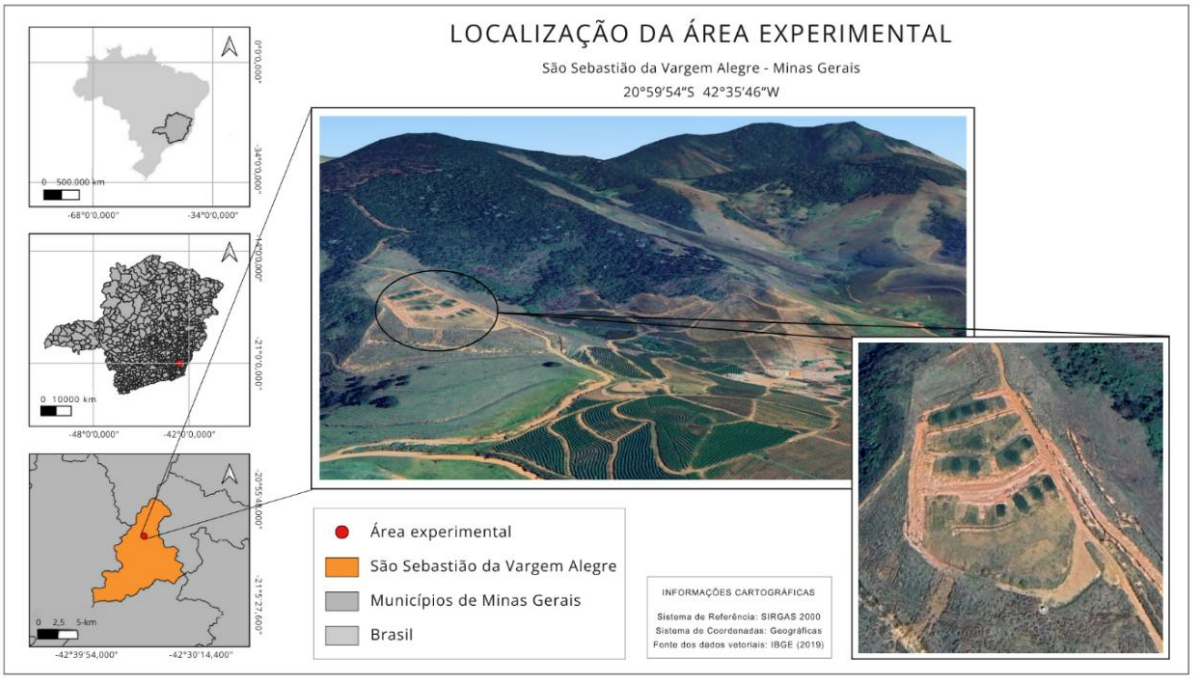
5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido em condições de campo em área onde houve extração de bauxita sob concessão da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA, na qual foi realizada reconfiguração topográfica do terreno. A propriedade que abriga o experimento está localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre – Minas Gerais (latitude 20°59’54”S e longitude 42°35’46”W) a 850 m de altitude (Figura 1). A região possui clima do tipo CWA, temperado úmido com inverno seco e verão quente, segundo a classificação de Köppen, sendo a precipitação média anual de 125,5 mm/ano com a temperatura máxima de 24°C e mínimas de 18°C (INMET, 2024).

As áreas mineradas, com ocorrência de bauxita, estão localizadas, em sua maioria, no topo de morros, onde predomina o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, argiloso. A vegetação nativa da região era a Mata Atlântica interiorana (Floresta tropical subperenifólia), mas a área em estudo está há mais de 50 anos sob pastagem. Inicialmente, foi implantado capim-gordura (*Melinis minutiflora*) e, mais recentemente (há 30 anos), este foi substituído por braquiária (*Urochloa decumbens*).

Figura 1. Localização da área experimental.

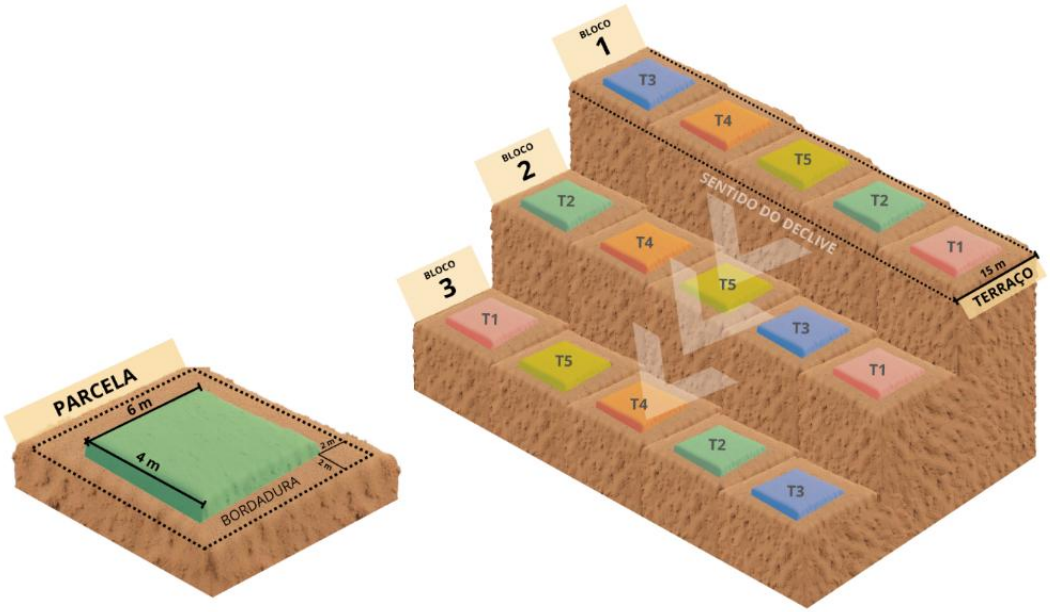


5.2. Metodologia

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos ao acaso, com três repetições, com cinco tratamentos: Tratamento 1: padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril); Tratamento 2: *topsoil* + torta de argila com melhoria química (controle); Tratamento 3: *topsoil* + tecno-solo com melhoria química e 30 g kg^{-1} de cama de aviário; Tratamento 4: *topsoil* + tecno-solo com melhoria química e com 90 g kg^{-1} de cama de aviário e Tratamento 5: *topsoil* + tecno-solo com melhoria química e com 160 g kg^{-1} de cama de aviário.

Dentro de cada bloco foram alocadas parcelas com 6 m de comprimento por 4 m de largura, com orientação no sentido paralelo da declividade dominante do terreno. Foi deixada uma faixa de bordadura de 2 m de largura ao redor de cada parcela (unidade experimental) para viabilizar práticas de manejo e avaliações do experimento (Figura 2).

Figura 2. Croqui da distribuição dos tratamentos nos blocos. Padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) (T1) e tecno-solo construídos com *topsoil* + torta de argila com adubação mineral + doses crescentes de cama de aviário (T2: 0, T3: 30, T4: 90 e T5: 160 g kg^{-1}).



5.3. Instalação e condução do experimento

Após o término do período de mineração, a área foi reconfigurada topograficamente (remoção de barrancos e poços de decantação) seguida por subsolagem profunda cruzada (1 m de profundidade) com *ripper* de haste longa acoplado a um trator de esteiras. Essa operação visa descompactar o material do fundo da mina (“estéril”) que frequentemente mostra-se compactado devido ao tráfego de máquinas e caminhões pesados, antes da construção das parcelas experimentais com tecno-solos.

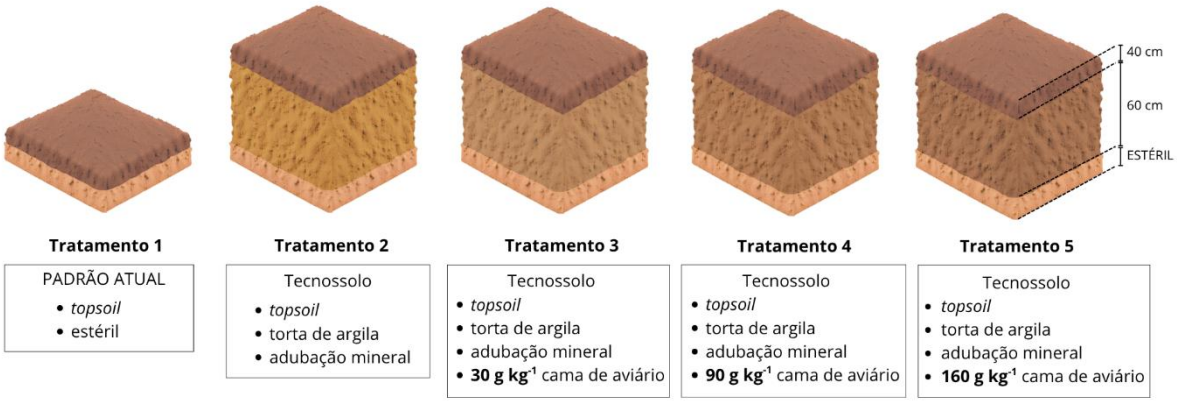
Foram construídas caixas de contenção com placas de MDF reforçadas para delimitar as parcelas e facilitar a disposição do material que comporia o tecno-solo. Dentro de cada estrutura, foi instalado um lisímetro (dimensão: 0,4 x 0,6 m) para coleta da água de infiltração (lixiviado) de cada parcela.

Os tecno-solos foram preparados de acordo com os tratamentos listados anteriormente. A mistura das combinações de torta de argila com a adubação mineral e porcentagens de cama de aviário aconteceu em pátio de blendagem, localizado no

pátio de minério da CBA, utilizando pá-carregadeira com concha equipada com balança para viabilizar a pesagem dos materiais (agosto/2022). As misturas foram transportadas com caminhões para a área experimental em 02 de agosto de 2022.

A construção dos tecno-solos em cada parcela experimental foi feita manualmente e com auxílio de uma retroescavadeira. A disposição das misturas nas parcelas, delimitadas pelas caixas de contenção, foi realizada sobre o estéril do fundo de mina, descompactado, de acordo com a casualização previamente estabelecida. Em seguida foi feita a distribuição do *topsoil* com espessura de 40 cm, igual para todas as parcelas. O tecno-solo dos tratamentos 2, 3, 4 e 5 tem espessura de 60 cm, considerando apenas a camada de torta de argila acrescida de adubação mineral e orgânica, + 40 cm de *topsoil*, resultando em perfil de um metro (Figura 3). O Tratamento 1 não pode ser considerado tecno-solo pois não é acrescido de torta de argila tratada; trata-se de um tratamento que segue o atual padrão de recuperação utilizado pela indústria de mineração, em que 30 a 40 cm de *topsoil* é devolvido sobre o estéril de fundo de mina.

Figura 3. Diagrama do perfil em profundidade dos tecno-solos construídos com torta de argila acrescida de diferentes porcentagens de cama de aviário, em condições de campo. Padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) (T1) e tecno-solo construído com *topsoil* + torta de argila com adubação mineral + doses crescentes de cama de aviário (T2: 0, T3: 30, T4: 90 e T5: 160 g kg^{-1}).



Todos os tecno-solos receberam adubação mineral basal com macro e micronutrientes, misturados por meio de pá-carregadeira equipada com concha com balança, antes de receberem a aplicação do adubo orgânico. Depois da mistura mineral inicial, foram aplicadas quantidades crescentes de cama de aviário

(terminação de 1 lote de frangos; base de serragem) obtida no mercado local, suficientes para atingir 0, 30, 90 e 160 g kg^{-1} da torta de argila (Tabela 1).

Tabela 1. Conversão das doses de cama de aviário aplicadas ao solo: em gramas de cama de aviário por quilograma de torta de argila e equivalência em gigagramas por hectare (Gg ha^{-1}), considerando a densidade do solo de 1,52 kg dm^{-3} e a profundidade de 60 cm.

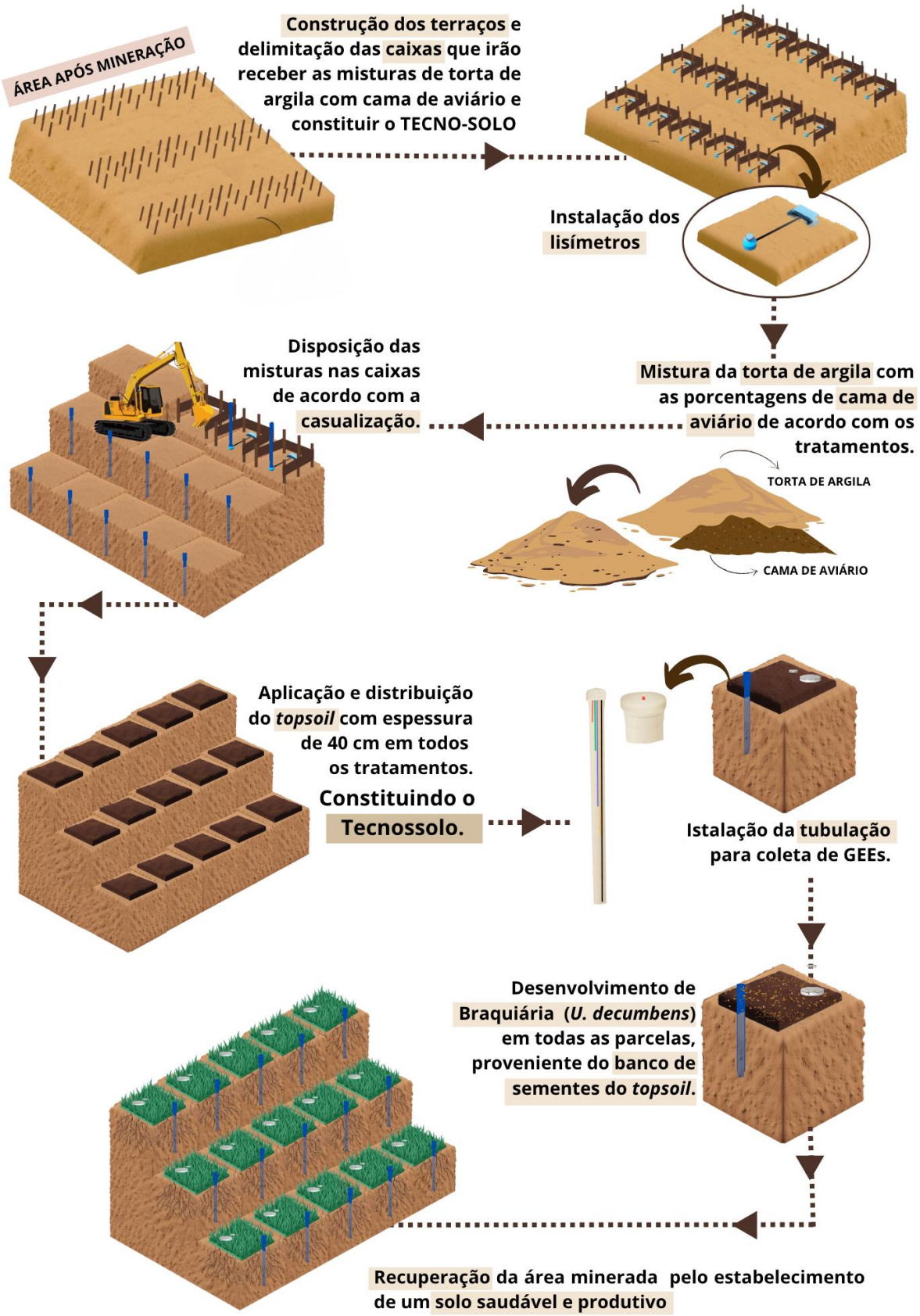
Dose g kg^{-1}	**Dose** Gg ha^{-1}
0	0,00
30	0,27
90	0,82
160	1,46

Trinta dias antes da primeira amostragem, visando reduzir o efeito do distúrbio nos fluxos, foram instalados nas parcelas tubos estratificados e câmaras estáticas, para coleta de gases. As câmaras estáticas forma compostas por colares de PVC com 20 cm de altura e 30 cm de diâmetro, inseridos em 5 cm de profundidade no solo. Devido às limitações operacionais, foram instaladas apenas nos tratamentos 2 e 4. As câmaras estratificadas foram compostas por tubos de PVC com 5 cm de diâmetro e 100 cm de altura, subdividido nas profundidades de 0- 10; 10-20; 20-40; 40-60 e 60 - 100 cm, permitindo a coleta de gases nessas camadas com o auxílio de tubulações identificadas em superfície. Estas foram instaladas em todas as parcelas.

A planta indicadora utilizada no experimento foi a braquiária decumbens (*U. decumbens*), tendo em vista que a área minerada deve ser devolvida ao proprietário com a vegetação original. Devido à sua presença no banco de sementes do *topsoil*, não foi necessário realizar a semeadura (Figura 4).

Na área não ocupada por parcelas, em cada bloco, foi espalhado *topsoil* com auxílio de um trator de esteira. Nessas áreas foram construídos terraços em nível a fim de favorecer a retenção e infiltração de água. Os terraços tem espaçamento de 30 m entre eles. As áreas não ocupadas pelas parcelas experimentais foram mantidas com vegetação de *U. decumbens* para minimizar a erosão.

Figura 4. Esquema de instalação do experimento.



5.4. Caracterização do subproduto do beneficiamento da bauxita (“torta de argila”)

O subproduto do beneficiamento da bauxita, chamado de torta de argila no presente estudo, resulta do processo de lavagem para a retirada dos argilominerais associados à bauxita, seguido pelo desaguamento por centrifugação em uma planta móvel específica da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Este processo transforma o subproduto, inicialmente com baixa concentração de sólidos, em torta de argila, um material sólido.

5.4.1. Análise física da “torta de argila”

Uma amostra de torta de argila foi retirada para a análise das características físicas do material e enviada para o Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, onde foram realizadas as análises: areia grossa por peneiramento com malha de 0,210 mm, silte e argila pelo método da pipeta com agitação lenta e sedimentação segundo a Lei de Stokes; argila dispersa em água (ADA) também pelo método da pipeta mas sem dispersante químico, densidade do solo (Ds) pelo método da proveta com compactação por “lançamento” em três etapas até a marca de 100 mL, densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico utilizando álcool etílico, porosidade total (PT) pela relação entre Dp e Ds, e classificação textural determinada por meio do triângulo textural baseado nas proporções de areia, silte e argila obtidas na análise granulométrica (Tabela 2).

Tabela 2. Características físicas da torta de argila.

Areia Grossa	**Areia Fina**	**Silte**	**Argila**	**ADA**	**Classificação Textural**	**Dp**	**Ds**	**PT**
---------- kg kg^{-1} ----------						-- kg d^{-3} --		m^3 m^{-3}
0,263	0,007	0,243	0,307	0,07	Franco-Argilosa	2,56	1,19	0,54

A densidade do solo foi determinada para cada tratamento pelo método do anel volumétrico após 840 dias de condução do experimento, nas profundidades de 20 cm, referente ao *topsoil*, e 55 cm, referente à torta de argila acrescida de cama de aviário (Tabela 3).

Tabela 3. Densidade do solo (Ds) nas profundidades de 20 e 55 cm para cada tratamento.

	Profundidade	
	20 cm	55 cm
Dose	**Ds**	
g kg^{-1}	kg dm^{-3}	
0	1,20	1,58
30	1,30	1,52
90	1,22	1,48
160	1,24	1,51

5.4.2. Análise química da “torta de argila”

Foi retirada uma amostra de torta de argila que foi enviada para o Laboratório de Rotina de Fertilidade do Solo, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG, onde foram feitas as análises. Para a caracterização química da torta de argila foram determinados: o pH em água (1:2,5) e KCl; o P e K extraídos com Mehlich-1 e determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; o Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; a acidez trocável (Al^{3+}) extraída com KCl 1 mol L^{-1} ; a acidez potencial (H+Al) extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} em pH 7,0. A partir dos resultados citados anteriormente, calculou-se a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica efetiva (t), a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T); o índice de saturação por alumínio (m) e a saturação por bases (V) (Tabela 4).

Tabela 4. Características químicas da torta de argila.

pH H_2O	**pH KCl**	**Al^{+3}**	**H+Al**	**SB**	**t**	**T**	**V**	**m**	**P**	**K**	**Na**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**
		---------- cmolc dm^{-3} ----------					----- % -----		----- mg dm^{-3} -----			cmolc dm^{-3}	
5,48	5,64	0,00	1,50	0,40	0,40	1,90	21,10	0,00	2,20	7,00	0,00	0,28	0,10

5.5. Caracterização do *topsoil*

O *topsoil* compreende o horizonte superficial do solo decapeado na etapa de supressão vegetal e armazenado nas extremidades da área minerada, com intuito de ser redistribuído após o fim da lavra para viabilizar o retorno de condições da área original em relação ao banco de sementes e microrganismos, assim como o incremento da MOS.

No presente estudo, o *topsoil* é proveniente do decapeamento e mistura do horizonte A e B do solo com pastagem estabelecida quase totalmente com o gênero Urochloa e com uso predominante da terra para pecuária leiteira a pasto. A região apresenta predominantemente a classe de solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura argilosa.

5.5.1. Análise química do *topsoil*

Uma amostra de *topsoil* foi coletada e enviada para o Laboratório de Rotina de Fertilidade do Solo, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG, onde foram feitas as análises. Para a caracterização química do *topsoil* foram determinados: o pH em água (1:2,5); o P e K extraídos com Mehlich-1 e determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; o Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; o Fe, Zn, Cu e Mn extraídos com Mehllich-1 e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; o N total do solo determinado por destilação Kjehdal, a acidez trocável (Al^{3+}) extraída com KCl 1 mol L^{-1} ; a acidez potencial (H+Al) extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} em pH 7,0. A partir dos resultados citados anteriormente, calculou-se a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica efetiva (t), a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T); o índice de saturação por alumínio (m) e a saturação por bases (V) (Tabela 5; Tabela 6).

Tabela 5. Caracterização química do *topsoil*.

pH H_2O	Al^{3+}	H+Al	SB	t	T	V	m	P-rem
		----------	cmolc dm^{-3}	----------		--- % ---		mg L^{-1}
4,71	0,98	7,2	0,36	1,34	7,56	4,8	73	6,9

Tabela 6. Teor de nutrientes no *topsoil*.

N	P	K	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Ca^{2+}	Mg^{2+}
dag kg^{-1}	----------	----------	----------	----------	mg dm^{-3}	----------	----------	----------	cmolc dm^{-3}	
0,085	0,8	2,0	35,7	0,23	0,41	3,8	55,5	0,55	0,28	0,07

5.6. Caracterização da cama de aviário

A cama de aviário consiste no material vegetal utilizado como cobertura do piso do galpão de criação de aves, acrescido de penas, dejetos e restos de ração provenientes de sua estadia no local. É um material rico em nutrientes, especialmente nitrogênio, e comumente utilizado como adubo orgânico (KELLEHER et al., 2002).

A motivação para a utilização da cama de aviário no presente estudo é seu potencial de fornecer nutrientes, além de sua disponibilidade na região, o que diminui os custos de transporte e garante o fornecimento. No presente estudo, a base da cama de aviário utilizada é a serragem.

5.6.1. Análise química da cama de aviário

Uma amostra da cama de aviário utilizada no estudo foi levada para o Laboratório de Rotina de Análise de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, onde foram realizadas as análises. O material vegetal foi submetido à digestão nítrico-perclórica e posterior determinação de P, K, S, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Zn, Cu, Mn na alíquota de leitura por espectrofotometria de absorção atômica. O N foi obtido após digestão sulfúrica, destilação completa (semimicro Kjeldahl), e determinação por titulometria (HCl 0,1mol L^{-1}) (Tabela 7).

Tabela 7. Caracterização química da cama de aviário.

N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cu	Fe	Zn	Mn
----------	----------	----------	dag kg^{-1}	----------	----------	----------	----------	mg kg^{-1}	----------	----------
1,32	0,23	1,75	0,71	0,19	0,21	0,09	12,38	298,23	72,45	138,10

5.7. Fracionamento da MOS

As amostras de solo foram coletadas no tempo 0 (correspondente a 30 dias após a mistura da cama de aviário a torta de argila), no ANO 1 (2023), no ANO 2 (2024) e no ANO 3 (2025). As profundidades de coleta foram de 0-40, 40-70 e 70-100. O fracionamento da MOS foi realizado segundo o método proposto por Cambardella & Elliot (1992). Em tubo de centrífuga foi pesado 10 g de TFSA e adicionado 30 ml de hexametafosfato de sódio (5 g L^{-1}). Agita-se por 15 horas a 140 rpm. A solução foi passada em peneira de 53 mm (270 mesh), lavada com água deionizada até a água apresentar cor límpida ao passar pela peneira e transferida em copos plásticos. A fração retida na peneira consiste em areia e MOP, enquanto a fração que passou pela peneira consiste em silte, argila e a MOAM. As frações peneiradas foram secas em estufa a 65 °C por sete dias, posteriormente pesadas, maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 150 mm (100 mesh).

5.8. Estoque de C e N nas frações da MOS

A partir da obtenção das frações MOP e MOAM das MOS, para cada profundidade (0-40, 40-70 e 70-100), seguiu-se a quantificação do teor de carbono e nitrogênio das frações e, posteriormente, o estoque dos nutrientes foi calculado.

5.8.1. Teor de carbono orgânico total e nitrogênio total

O teor de carbono orgânico e nitrogênio total nas frações (MOP e MOAM) foi quantificado por espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS 20 20 ANCA-GLS, Sercon, Crewe, UK).

5.8.2. Teor de carbono lábil

A quantificação foi feita via oxidação com permanganato segundo a proposta adaptada por Shang & Tiessen (1997) para solos tropicais. Para tanto, foram pesadas

0,8 g de MOP e 0,8 g de MAM, previamente maceradas e passadas em peneira de 150 mm (100 mesh). Foi adicionado ao solo 2 ml de solução de $KMnO_4$ (0,333 mol/L) padronizado e 18 ml de água deionizada. Após agitação por 30 minutos a 140 rpm, os tubos foram deixados em repouso por 10 minutos. Em seguida, 0,5 ml do sobrenadante foi transferido para outro tubo com 49,5 ml de água deionizada e agitado manualmente. A solução resultante teve a absorbância lida em um espectrômetro a 565 nm. A calibração foi feita com soluções de $KMnO_4$ variando de 0,02 a 0,033 mol/L. O teor de carbono lábil foi calculado com base na quantidade de MnO_4 consumido mediante a oxidação do C lábil da amostra.

5.8.3. Cálculo do estoque dos nutrientes

A quantificação dos estoques de carbono orgânico total, nitrogênio total e carbono lábil foi realizada conforme a metodologia descrita por Rittl et al. (2017), utilizando as equações 1, 2 e 3, respectivamente:

$$e\mathrm{COT} = t\mathrm{C}\ x\ d\mathrm{S}\ x\ v\mathrm{S} \qquad \text{Equação 1}$$

$$e\mathrm{NT} = t\mathrm{N}\ x\ d\mathrm{S}\ x\ v\mathrm{S} \qquad \text{Equação 2}$$

$$e\mathrm{CL} = t\mathrm{CL}\ x\ d\mathrm{S}\ x\ v\mathrm{S} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde, *e*COT: estoque de carbono de compostos orgânicos total das frações da MOS (Mg ha^{-1}); *e*NT: estoque de nitrogênio total das frações da MOS (Mg ha^{-1}); *e*CL: estoque de carbono lábil de compostos orgânicos das frações da MOS (Mg ha^{-1}); *t*C*:* teor de carbono das frações da MOS (g kg^{-1}); *t*N: teor de nitrogênio das frações da MOS (g kg^{-1}); *t*CL*:* teor de carbono lábil das frações da MOS (g kg^{-1}); *d*S: densidade do solo (g cm^{-3}) e *v*S: volume de solo referente a profundidade considerada (dm^3).

5.8.4. Grau de saturação e déficit de saturação de carbono do solo

Para determinar o grau de saturação de carbono do solo da fração MOAM (GSc), inicialmente estimou-se o limite de saturação de carbono na fração silte + argila (LSc) multiplicando-se, por quilograma de solo, a proporção dessa fração pela

referência de 46 g C kg^{-1}, conforme Six et al. (2024), que indicam estabilização máxima de 46 ± 4 g C por quilograma de silte + argila em solos com predominância de argilas do tipo 1:1. O GSc foi calculado pela Equação 4:

$$GSc = \frac{C-MOAM}{LSc} \times 100 \qquad \text{Equação 4}$$

Onde, GSc: grau de saturação de C do solo (%); C-MOAM: teor de C na fração MOAM por kg de solo (g kg^{-1}); LSc: limite de saturação de C na MOAM (silte + argila) por kg de solo (g kg^{-1}).

5.9. Biomassa vegetal

5.9.1. Massa de matéria seca de parte aérea

A biomassa vegetal da braquiária foi coletada de acordo com o crescimento das plantas, para isso foi estabelecido uma altura limite em que as plantas de pelo menos um tratamento deveria atingir (40 cm). Assim, totalizaram-se 11 coletas referentes ao ANO 1 (Janeiro/2023, abril/2023, maio/2023, junho/2023 e outubro/2023, 365 dias), ANO 2 (dezembro/2023, fevereiro/202, abril/2024 e outubro/2024; 365 dias) e ANO 3 (dezembro/2024 e fevereiro/2025; 100 dias). Em cada coleta, a biomassa de parte aérea da braquiária, de cada parcela, foi totalmente roçada e retirada da parcela. Foi quantificada, em balança, a massa de matéria fresca do material vegetal total e coletada uma subamostra de cerca de 100 g, imediatamente após o corte. A subamostra foi seca em estufa de circulação de ar forçado por 5 dias. Foi quantificada a massa de matéria seca da subamostra e a partir dela foi feita a correção da massa de matéria fresca para massa de matéria seca total da biomassa de parte aérea em toneladas por hectare.

5.9.2. Dose de máxima eficiência econômica

A dose de máxima eficiência econômica (DMEE) foi determinada com base em 90% da dose de máxima eficiência física para a produção de massa de matéria seca

da braquiária em função das doses de cama de aviário. A estimativa foi realizada por meio da primeira derivada da equação de regressão ajustada a um modelo polinomial ($y = a_2x^2 + a_1x + a$), considerando a resposta da produtividade acumulada ao longo dos 840 dias de experimento. A DMEE corresponde à dose associada a 90% do valor máximo estimado de produção ($y_{máx}$) pela curva de resposta.

5.9.3. Massa de matéria seca de raiz

A biomassa de raiz da braquiária foi coletada no mês de junho do ANO 2 e do ANO 3, totalizando duas coletas. Foram amostradas, por meio de sonda, as raízes das profundidades 0-40 cm (referente ao *topsoil*), 40-70 e 70-100 cm. As raízes foram selecionadas por catação manual com auxílio de pinça, lavadas e secas em estufa de circulação de ar forçado por 5 dias. Foi quantificada a massa de matéria seca de raiz da amostra correspondente ao volume de solo amostrado pela sonda (g sonda^{-1}) e, a partir dela, foi feita a correção da massa de matéria seca de raiz em toneladas por hectare, considerando a densidade e a profundidade correspondente a cada profundidade.

5.9.4. Teor de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de parte aérea e raiz

O teor de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de parte aérea e raiz foi quantificado por espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS 20 20 ANCA-GLS, Sercon, Crewe, UK).

5.9.5. Estoque de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de parte aérea e raiz

O cálculo dos estoques foi realizado pelo produto entre o teor de C e N da biomassa (em g kg^{-1}) e a respectiva massa de matéria seca (em Mg ha^{-1}) obtida para o período analisado. No caso da parte aérea, como todo o material foi removido da área experimental ao longo do estudo, utilizou-se o somatório da massa de matéria

seca acumulada durante todo o período de avaliação, correspondente a 840 dias. Para as raízes, o estoque de carbono e nitrogênio foi calculado utilizando-se a massa de matéria seca quantificada ao final do terceiro ano de experimento, considerando-se que essa fração não foi removida pelo manejo durante o período avaliado.

5.10. Gases de efeito estufa

Os fluxos dos gases dióxido de carbono, óxido nitroso e metano (gases de efeito estufa - GEEs) foram mensurados ao longo de 3 anos de condução do experimento, nos seguintes meses: novembro e dezembro de 2022; janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2023; e janeiro e fevereiro de 2024, totalizando 16 coletas. Foram duas as vias de coleta de gases, câmara estática e câmara estratificada. Em ambas, os gases foram coletados por meio de seringas com volume de 60 mL equipadas com válvulas tipo ¨three way", a qual possibilita o fechamento após a coleta.

No momento da amostragem dos gases, as câmaras estáticas foram fechadas com tampas de PVC dotadas de septo de borracha na parte superior, que possibilitou a coleta dos GEEs no interior da câmara e restringiu a passagem de ar do solo para a atmosfera (FIALHO et al., 2018). Os gases foram coletados nos intervalos de 0, 10, 20, 30 minutos após o fechamento das câmaras, sendo o tempo 0 min referente a coleta diretamente da atmosfera. Concomitantemente, realizou-se a coleta em câmara estratificada, nos mesmos intervalos de tempo. Por meio da compartimentação presente no interior da câmara, referentes às profundidades de 0 – 10, 10 – 20, 20 – 40, 40 – 60 e 60 – 100 cm, e ligamento de tubulações a cada uma delas, identificadas superficialmente, procedeu-se com a coleta de gases referente às profundidades citadas. No momento da coleta dos gases foi feita a medição da temperatura do ar a 5 cm de altura do solo. As amostras foram levadas para o laboratório no mesmo dia e analisadas na mesma semana.

5.10.1. Concentração dos gases de efeito estufa em profundidade

As concentrações de CO_2, CH_4 e N_2O foram determinadas por meio de um cromatógrafo à gás equipado com espectrômetro de massas (GC-MS QP2010SE – Shimadzu Corporation). Os valores foram obtidos em partes por milhão (mol m^{-3}) e foram convertidos em C_{eq}, considerando o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases CO_2, CH_4 e N_2O, como: 1, 27 e 273, respectivamente.

5.10.2. Fluxo dos gases de efeito estufa

Os fluxos de CO_2, CH_4 e N_2O do solo foram calculados segundo a Equação 5, proposta por Smith e Conen (2004). Os valores foram obtidos em miligrama de gás por hora em um metro quadrado de atmosfera (mg ha^{-1} m^{-2}) e, posteriormente, transformados em C_{eq}, considerando o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases CO_2, CH_4 e N_2O, como: 1, 27 e 273, respectivamente.

$$\text{Fluxo} = \frac{\frac{\Delta Q}{\Delta t} \text{ x M x P x V}}{\text{R x T x A}} \qquad \text{Equação 5}$$

Em que, $\Delta Q/\Delta t$: coeficiente angular (ppm s^{-1}), obtido do ajuste das concentrações dos gases ao longo do tempo de coleta pré-determinado; *M*: massa molar do gás (g mol^{-1}); *P*: pressão constante de 1 atm; *V*: volume da câmara (L); *R*: constante dos gases (0,08205746); *T*: temperatura do solo (K) e *A*: área da câmara (m^2).

5.10.3. Emissão acumulada dos gases de efeito estufa

A emissão acumulada dos gases CO_2, CH_4 e N_2O no período de 764 dias foi calculada segundo a equação proposta por Cai et al., 2012 (Equação 6):

$$\text{EA}_{\text{GEE}} = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{(F_i + F_{i+1})}{2}\right] \text{x } [(t_{i+1} - t_i) \text{ x } 24] \qquad \text{Equação 5}$$

Em que, EA_{GEE}: emissão acumulada (mg m^{-2} h^{-1}); F: fluxo do gás (mg m^{-2} h^{-1}); i: i-ésima medição; (t_{i+1} + t_1): dias entre duas medições consecutivas e; n: número total de medições.

Os valores de emissão acumulada de cada GEE foram obtidos em proporções de C_{eq}. Estes foram somados para obtenção da emissão acumulada de C em Mg ha^{-1} no período de 764 dias.

5.13. Lixiviado

Os lixiviados compreendem a água de infiltração. A adição de cama de aviário no tecno-solo, material rico em N e P, pode gerar lixiviados com teores desses nutrientes acima dos limites estabelecidos pela resolução nº 357/2005 do CONAMA (ROSADO, 2023). Podendo resultar na contaminação de lençóis freáticos e eutrofização de cursos d'água, tendo em vista que esses nutrientes são potencializadores de eutrofização (OVIEDO-RONDÓN, 2008). Assim, é necessário realizar o monitoramento do teor desses nutrientes no lixiviado resultante do solo acrescido de resíduos orgânicos, tal como no presente estudo.

Os lixiviados foram coletados após chuvas torrenciais, por significar maior possibilidade de conter água coletada nos lisímetros, resultando no total de cinco coletas, em: novembro/2023, fevereiro/2024, junho/2024, novembro/2024 e fevereiro/2025. O lixiviado armazenado nos lisímetros foi amostrado por meio de sucção por bomba de filtragem. O volume coletado foi medido e prontamente levado ao laboratório. Uma subamostra de 50 ml foi retirada para a determinação do pH, em pHmetro de bancada e condutividade elétrica, em condutivímetro de bancada. Após estas análises, o restante das amostras foi refrigerada para posterior análise do teor de amônio, nitrato e fósforo inorgânico no lixiviado pelo método de determinação de nutrientes em microplacas, adaptado de Aridlands Ecology Laboratory Protocol (2010), para cada coleta. Os teores de $N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_3^-$ e P obtidos em cada coleta foram comparados aos limites estabelecidos pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA para águas de Classe 3. Os valores de referência são: nitrogênio amoniacal total (para pH < 7,5) = 13,3 mg L^{-1}, nitrato = 10 mg L^{-1} e fósforo total (em ambientes lênticos) = 0,05 mg L^{-1}. Como também, para cada coleta, o teor de carbono e nitrogênio foi mensurado por espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS 20

20 ANCA-GLS, Sercon, Crewe, UK). A partir dos teores e dos volumes quantificados, a quantidade total dos nutrientes lixiviados foi determinada.

5.13.1. Teor de amônio

Em placa de elisa, foram adicionadas 20 μl da amostra do lixiviado, 90 μl de solução de silicilato e 90 μl da solução alvejante. Em seguida, as soluções foram agitadas por meio de suaves batidas na ponta da placa. Após 50 minutos, foi realizada a leitura em leitor de placa ajustado em 650 nm. Os teores de $N\text{-}NH_4^+$ (mg L^{-1}) foram obtidos para as quatro primeiras coletas.

5.13.2. Teor de nitrato

Foram adicionadas 100 μl da amostra do lixiviado e 100 μl de solução coquetel de vanádio em placa de elisa. Posteriormente, as soluções foram agitadas por meio de batidas suaves na ponta da placa. Passados 50 minutos, a leitura das amostras foi realizada em leitor de placa a 650 nm. Os teores de $N\text{-}NO_3^-$ (mg L^{-1}) foram obtidos para as quatro primeiras coletas.

5.13.3. Teor de fósforo inorgânico

Em placa de elisa, foram adicionadas 150 μl da amostra do lixiviado e 30 μl de solução de para-molibdato de amônio. Após 10 min, foram acrescentados 30 μl de solução verde de malaquita. Posteriormente, foram dadas batidas suaves na ponta da placa no intuito de misturar as soluções. Depois de 30 min, a leitura das amostras foi realizada em leitor de placa a 630 nm. Os teores de P (mg L^{-1}) foram obtidos para as quatro primeiras coletas.

5.13.4. Teor de carbono e nitrogênio

O lixiviado foi agitado manualmente para homogeneização, posteriormente, coletou-se uma alíquota de 20 mL, transferida para tubo Falcon e levada à estufa de circulação de ar forçado a 65 °C até secagem total, restando apenas os sólidos. A massa seca desses sólidos foi quantificada e, em seguida, aproximadamente 20 mg do material foram pesados em microbalança para análise dos teores de C e N em IRMS. Os teores foram convertidos para valores em miligrama por litro (mg L^{-1}), de acordo com a massa seca total de cada amostra.

5.13.5. Total de C, N, N-NH_4^+, N-NO_3^- e P lixiviado

Os teores de C e N (mg L^{-1}) acumulados ao longo das cinco coletas, e os teores de N-NH_4^+, N-NO_3^- e P (mg L^{-1}) acumulados ao longo de quatro coletas, convertidos em kg m^{-3}, foram multiplicados pelo volume total de lixiviado (m^3 ha^{-1}, considerando a dimensão do lisímetro como 0,6 m de comprimento por 0,4 m de largura e a profundidade do perfil como um metro). A quantidade total de C, N, N-NH_4^+, N-NO_3^- e P lixiviado (kg ha^{-1}), produto da operação, foi convertida para Mg ha^{-1}.

5.14. Balanço de carbono

Para estimar o saldo do balanço de carbono (BC, Mg ha^{-1}) no sistema em função da dose de máxima eficiência econômica para a produção de massa de matéria seca da parte aérea da braquiária, foram considerados os principais fluxos de entrada e saída de carbono. As entradas abrangeram: (i) o estoque de carbono orgânico total (C - COT, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e MOAM, mensurado nas profundidades de 0–40, 40–70 e 70–100 cm no terceiro ano de experimento; (ii) o estoque de carbono na massa de matéria seca de raízes (C-*m*MS_R, Mg ha^{-1}) da braquiária, nas profundidades de 0–40 e 40–100 cm, também no terceiro ano; e (iii) o estoque de carbono acumulado na massa de matéria seca da parte aérea (C-*m*MS_PA, Mg ha^{-1}) da braquiária durante os 840 dias de avaliação. As saídas de carbono incluíram: (i) o estoque de carbono lábil (C-CL, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e

MAM nas profundidades de 0–40, 40–70 e 70–100 cm no terceiro ano; (ii) a emissão acumulada (C-GEE, Mg ha^{-1}) dos gases de efeito estufa (CO_2, CH_4 e N_2O), convertida em carbono equivalente (C_{eq}), referente à aplicação da dose de 90 g kg^{-1} de cama de aviário; e (iii) o carbono perdido por lixiviação (C-LIX, Mg ha^{-1}). A diferença entre essas entradas e saídas forneceu o saldo líquido de carbono no sistema, que pode ser expresso pela equação 7.

$$BC = (C\text{-}COT + C\text{-}mMS_PA + C\text{-}mMS_R) - (C\text{-}CL + C\text{-}GEE + C\text{-}LIX) \quad \text{Equação 7}$$

Como a emissão acumulada dos GEEs só pôde ser mensurada nos tratamentos com 0 e 9 g kg^{-1} de cama de aviário, devido às limitações operacionais dos equipamentos de coleta de gases, adotou-se, para a dose de máxima eficiência econômica (DMEE = 21,7 g kg^{-1}), o valor de emissão acumulada correspondente à dose de 9 g kg^{-1} CA. Essa escolha se justifica por se tratar da realização do aporte de um resíduo orgânico: ainda que a dose real seja inferior, do ponto de vista da avaliação ambiental, é preferível considerar uma superestimativa.

O carbono lábil foi considerado uma saída do sistema por representar uma fração pouco persistente do carbono orgânico total. O estoque de C da massa de matéria seca da braquiária foi contabilizado com base no período total de avaliação (840 dias), uma vez que a parte aérea foi completamente removida das parcelas para fins de quantificação, presumindo-se que o carbono desse compartimento poderia ser aportado ao solo. No caso das raízes, como não foram totalmente removidas para quantificação, utilizou-se o valor de estoque de C mensurado no terceiro ano de experimento.

5.15. Análises estatísticas

Os dados foram inicialmente submetidos ao teste de normalidade de Jarque-Bera ($p < 0,10$) e à verificação da homogeneidade de variâncias por meio de Barlett ($p < 0,10$). Confirmadas a normalidade e a homocedasticidade, realizou-se análise de variância (ANOVA) adotando-se nível de significância de 10%. Para as variáveis que apresentaram efeito significativo, foram ajustados os modelos de regressão conforme a relação entre a dose de cama de aviário e as variáveis de interesse. Todas as

análises estatísticas foram conduzidas no software em planilha eletrônica SPEED Stat, versão 2.4.

6. RESULTADOS

6.1. Estoque de carbono orgânico e nitrogênio total e carbono lábil nas frações da matéria orgânica do solo

Os estoques de carbono orgânico total nas frações matéria orgânica particulada e matéria orgânica associada aos minerais variaram conforme a profundidade do solo e ao longo do tempo em resposta às doses de cama de aviário (Figura 5).

Na camada superficial (0-40 cm), correspondente ao *topsoil*, não se observou efeito direto dos tratamentos, de modo que os estoques de COT das frações MOP e MOAM permaneceram constantes, independentemente das doses de cama de aviário aplicadas. Na fração MOP dessa profundidade, os valores variaram entre 11,8 e 18,8 Mg ha^{-1}, com aumento de 40,0% do ANO 1 para o ANO 2, seguido de uma redução de 59,3% do ANO 2 para o ANO 3, sendo este último o período com o menor estoque registrado. Para a mesma profundidade, a fração MOAM apresentou aumento do estoque de COT ao longo do tempo, passando de 51 Mg ha^{-1} no ANO 1 para 78 Mg ha^{-1} no ANO 3, o que representou incremento de 53,0%.

Nas profundidades de 40-70 cm e 70-100 cm da fração MOP, observou-se comportamento semelhante, com aumento progressivo do estoque de COT em função do aumento das doses de cama de aviário. No tempo 0, registrou-se as maiores respostas, atingindo até 56,45 Mg ha^{-1} na dose de 160 g kg^{-1} de cama de aviário em ambas as profundidades, com acréscimo de 2,68 Mg ha^{-1} no estoque de COT para cada unidade percentual de cama de aviário aplicada. Ao longo dos anos, houve diminuição dos estoques, embora ainda se observou incremento em função das doses de cama de aviário, como evidenciado pelos coeficientes angulares das regressões. No ANO 3, o estoque de COT atinge 15,33 Mg ha^{-1} e 11,98 Mg ha^{-1} na dose de 160 g kg^{-1} de cama de aviário nas profundidades de 40-70 cm e 70-100 cm, respectivamente, representando reduções de 268,2% e 371,2% em relação ao tempo 0.

O estoque de COT da fração MOP na camada superficial foi inferior ao das camadas subsuperficiais tratadas com 90 e 160 g kg^{-1} de cama de aviário, sendo semelhante, em média, ao tratamento com 30 g kg^{-1} de cama de aviário.

Os estoques de COT da fração MOAM na profundidade de 40-70 cm aumentaram com o incremento das doses de cama de aviário, especialmente no tempo 0 (1,2 Mg ha^{-1}), ANO 1 (1,2 Mg ha^{-1}) e ANO 2 (0,29 Mg ha^{-1}). No ANO 3, observou-se tendência de estabilização, com valores constantes, indicando que as doses não influenciaram o estoque. Para a profundidade de 70-100 cm da mesma fração, o estoque aumentou em função das doses no tempo 0, permaneceu constante em relação às doses no ANO 1 e tendeu à estabilização ou redução nas doses mais altas nos ANOS 2 e 3.

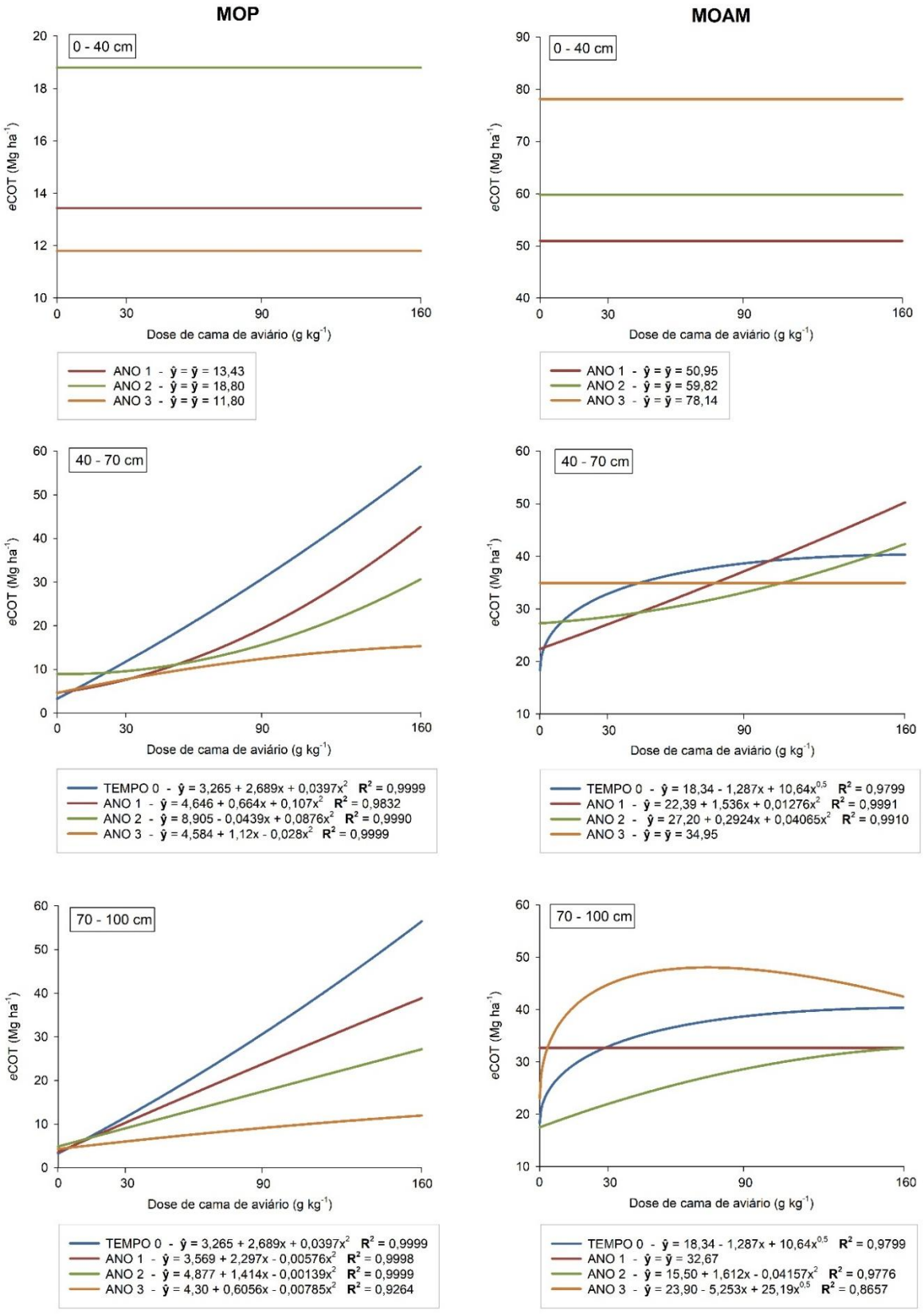
O estoque de carbono lábil (CL) nas frações MOP e MOAM variou de acordo com as doses de cama de aviário aplicadas, sendo que a fração MOP apresentou maior variação ao longo dos anos (Figura 6).

Na camada superficial (0-40 cm), o estoque de CL na fração MOP manteve-se constante nos dois primeiros anos (3,55 e 4,62 Mg ha^{-1}, respectivamente), indicando ausência de efeito indireto das doses de cama de aviário nesse período. No ANO 3, contudo, observou-se uma resposta linear positiva, com acréscimo de 1,17 Mg ha^{-1} de CL no estoque para cada unidade percentual de cama de aviário, atingindo até 15 Mg ha^{-1} na dose de 160 g kg^{-1}. Para a mesma profundidade, a fração MOAM apresentou incremento linear já no ANO 1, alcançando 10,14 Mg ha^{-1} na maior dose de cama de aviário (160 g kg^{-1}), seguido por estabilização em valores médios nos anos seguintes (6,73 Mg ha^{-1} no ano 2 e 7,85 Mg ha^{-1} no ANO 3).

Nas camadas subsuperficiais (40-70 e 70-100 cm), a resposta inicial (tempo 0) foi caracterizada por aumentos lineares em ambas as frações, com acréscimos de 0,95 Mg ha^{-1} e 0,37 Mg ha^{-1} por unidade percentual de cama de aviário para MOP e MOAM, respectivamente, atingindo 15,62 Mg ha^{-1} (MOP) e 6,56 Mg ha^{-1} (MOAM) na dose máxima (160 g kg^{-1}).

Figura 5. Estoques de carbono orgânico total (*e*COT, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e MOAM da matéria orgânica do solo em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) em resposta de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nos períodos avaliados: Tempo 0, ANO 1, ANO 2 e ANO 3. Os modelos ajustados correspondentes a média em razão do valor constante ($\hat{y} = \bar{y}$), assim como os modelos

ajustados e os coeficientes de determinação para as curvas de regressão (ŷ e R^2, respectivamente), estão apresentados na legenda.



Nos anos 1, 2 e 3, a fração MOP dessas camadas apresentou redução dos estoques ao longo do tempo, embora os estoques ainda aumentassem com as doses de cama de aviário, porém com resposta menos acentuada a cada ano. No ANO 3, registrou-se o menor estoque do período, com 5,83 Mg ha^{-1} em 40-70 cm e 5,49 Mg ha^{-1} em 70-100 cm, representando reduções de 168% e 184% em relação ao tempo 0, respectivamente. Para a fração MOAM, na camada de 40-70 cm, os estoques de CL na dose de 160 g kg^{-1} de cama de aviário foram de 10,07 Mg ha^{-1} (ANO 1), 4,88 Mg ha^{-1} (ANO 2) e 7,34 Mg ha^{-1} (ANO 3). Na camada de 70-100 cm, os valores foram de 9,26 Mg ha^{-1}, 5,69 Mg ha^{-1} e 6,44 Mg ha^{-1}, respectivamente. Observou-se um aumento de 53,5% e 41,1% do tempo 0 para o ANO 1, seguido de redução de 106,3% e 62,7% do ANO 1 para o ANO 2, e novo aumento de 50,4% e 13,2% do ANO 2 para o ANO 3, para as profundidades de 40-70 e 70-100 cm, respectivamente. No último ano, os valores se aproximaram àqueles observados no tempo 0 para ambas as camadas.

O estoque de carbono lábil representa uma fração minoritária em relação ao carbono orgânico total do solo nas frações MOP e MOAM (Figura 22 e Figura 23, anexo). A porcentagem de carbono lábil em relação ao carbono orgânico total apresenta flutuações entre os anos, as doses de cama de aviário e as profundidades, sendo encontrados valores médios de 27% para a fração MOP e 12% para a fração MOAM.

Na camada superficial (0–40 cm), os teores de silte e argila de 21,7 e 44,1 dag kg^{-1} resultaram em uma proporção de silte + argila correspondente a 0,658 kg kg^{-1}, conferindo um limite de saturação de carbono - LSc de 30,27 g C kg^{-1} solo (Tabela 8). Enquanto que na camada subsuperficial (40–100 cm), com silte de 29,3 e argila de 29,7 dag kg^{-1}, a proporção foi menor (0,590 kg kg^{-1}), gerando um LSc de 27,14 g C kg^{-1} solo.

Figura 6. Estoque de carbono lábil (*e*CL, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e MOAM da matéria orgânica do solo em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) em resposta de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nos períodos avaliados: Tempo 0, ANO 1, ANO 2 e ANO 3. Os modelos ajustados correspondentes a média em razão do valor constante ($\hat{y} = \bar{y}$), assim como os modelos ajustados e os coeficientes de determinação para as curvas de regressão ($\hat{y}$ e R^2, respectivamente), estão apresentados na legenda.

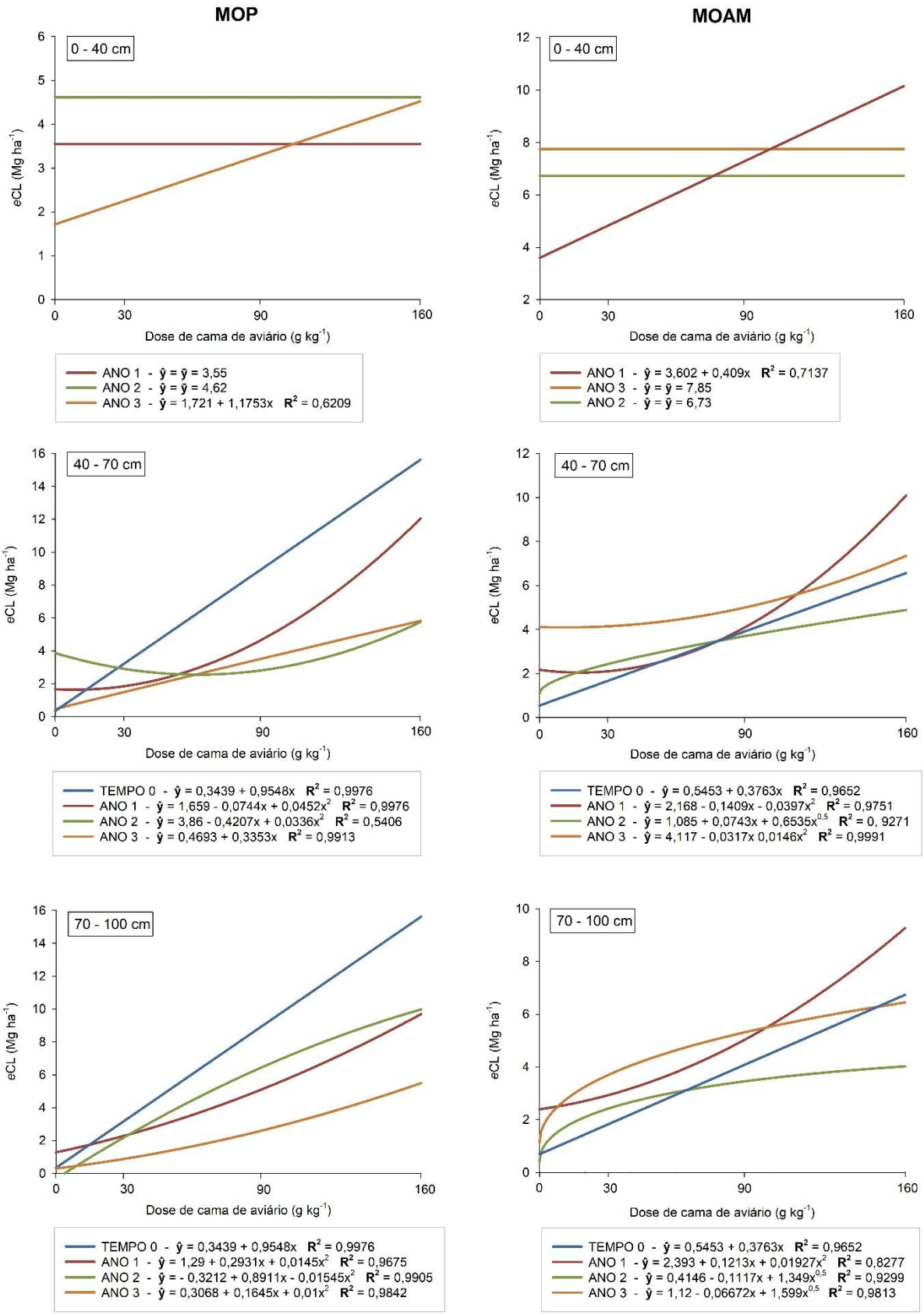

MOP
MOAM
0 - 40 cm
eCL (Mg ha-1)
Dose de cama de aviário (g kg-1)
ANO 1 - ŷ = ȳ = 3,55
ANO 2 - ŷ = ȳ = 4,62
ANO 3 - ŷ = 1,721 + 1,1753x R2 = 0,6209
ANO 1 - ŷ = 3,602 + 0,409x R2 = 0,7137
ANO 3 - ŷ = ȳ = 7,85
ANO 2 - ŷ = ȳ = 6,73
40 - 70 cm
TEMPO 0 - ŷ = 0,3439 + 0,9548x R2 = 0,9976
ANO 1 - ŷ = 1,659 - 0,0744x + 0,0452x2 R2 = 0,9976
ANO 2 - ŷ = 3,86 - 0,4207x + 0,0336x2 R2 = 0,5406
ANO 3 - ŷ = 0,4693 + 0,3353x R2 = 0,9913
TEMPO 0 - ŷ = 0,5453 + 0,3763x R2 = 0,9652
ANO 1 - ŷ = 2,168 - 0,1409x - 0,0397x2 R2 = 0,9751
ANO 2 - ŷ = 1,085 + 0,0743x + 0,6535x0,5 R2 = 0, 9271
ANO 3 - ŷ = 4,117 - 0,0317x 0,0146x2 R2 = 0,9991
70 - 100 cm
TEMPO 0 - ŷ = 0,3439 + 0,9548x R2 = 0,9976
ANO 1 - ŷ = 1,29 + 0,2931x + 0,0145x2 R2 = 0,9675
ANO 2 - ŷ = - 0,3212 + 0,8911x - 0,01545x2 R2 = 0,9905
ANO 3 - ŷ = 0,3068 + 0,1645x + 0,01x2 R2 = 0,9842
TEMPO 0 - ŷ = 0,5453 + 0,3763x R2 = 0,9652
ANO 1 - ŷ = 2,393 + 0,1213x + 0,01927x2 R2 = 0,8277
ANO 2 - ŷ = 0,4146 - 0,1117x + 1,349x0,5 R2 = 0,9299
ANO 3 - ŷ = 1,12 - 0,06672x + 1,599x0,5 R2 = 0,9813

Tabela 8. Proporção de silte (dag kg⁻¹), argila (dag kg⁻¹) e silte + argila (kg kg⁻¹) do *topsoil* e da torta de argila e seus correspondentes limites de saturação de carbono (LSc, g kg⁻¹) na fração MOAM.

Solo	Silte	Argila	Silte + Argila	LSc
	---- dag kg^{-1} ----		--- kg kg^{-1} ---	-- g kg^{-1} --
Topsoil (0-40 cm)	21,7	44,1	0,658	30,27
Torta de argila (40-100 cm)	29,3	29,7	0,590	27,14

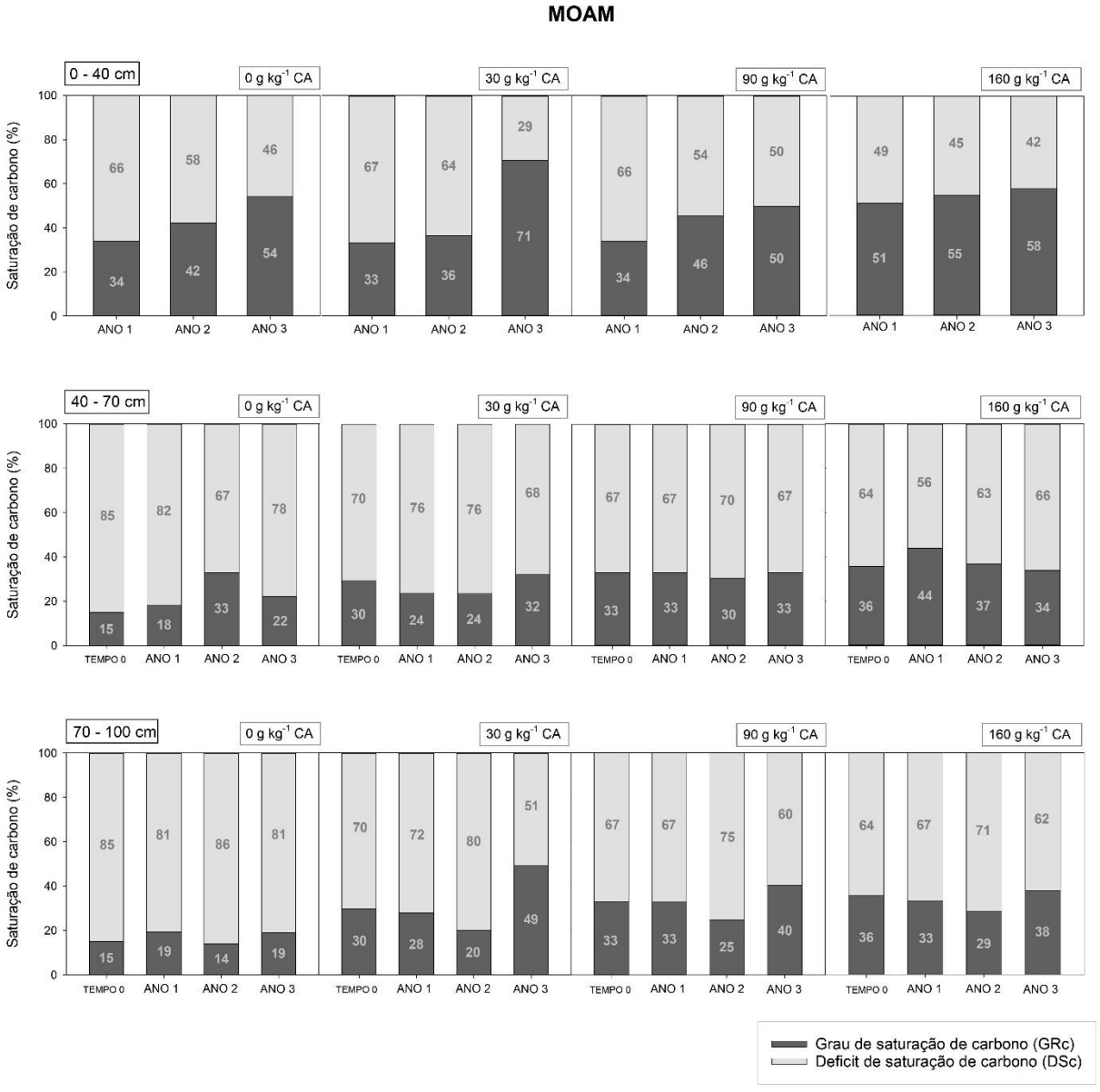
Verifica-se que solos com maior proporção de silte + argila têm potencialmente maior capacidade de saturação de carbono, de modo que o horizonte superficial (0-40 cm, *topsoil*) dispõe de limite de saturação mais elevado, refletindo maior potencial máximo de armazenamento de carbono.

A partir disso foi determinado o grau de saturação de carbono (GSc) e o déficit de saturação de carbono (DSc) da camada superficial (0-40 cm) - correspondente ao *topsoil* - e das camadas subsuperficiais (40-70 e 70-100 cm), construídas com torta de argila (Figura 7).

A camada superficial (0-40 cm), que não recebeu aplicação direta de cama de aviário e sofreu apenas influência indireta do resíduo orgânico, apresentou elevação acentuada do GSc ao longo dos anos em todos os tratamentos, com destaque para o ANO 3 da dose de 30 g kg^{-1} de cama de aviário, que registrou o maior grau de saturação entre todas as camadas e doses avaliadas. Embora não tenha sido verificada influência clara das doses de cama de aviário na camada de 0-40 cm, observou-se que o tratamento com 160 g kg^{-1} de CA apresentou a maior média de GSc ao longo dos anos entre as doses testadas: 0 g kg^{-1} = 43%, 30 g kg^{-1} = 46%, 90 g kg^{-1} = 43% e 160 g kg^{-1} = 54%.

As camadas subsuperficiais não apresentaram diferenças altamente pronunciadas do GSc ao longo dos anos para cada dose de CA. No entanto, foi possível evidenciar aumentos no grau de saturação em relação à média do período analisado para cada dose: 22% e 16% (0 g kg^{-1} CA), 27,5% e 31,7% (30 g kg^{-1} CA), 32,2% e 32,75% (90 g kg^{-1} CA) e 37,5% e 34% (160 g kg^{-1} CA) para as profundidades de 40-70 e 70-100 cm, respectivamente. Esses valores representaram aumentos de 70,5% e 112,5% da dose de 160 g kg^{-1} em relação ao controle para as profundidades de 40-70 e 70-100 cm, respectivamente.

Figura 7. Grau de saturação de carbono (GRc, %) e Déficit de saturação de carbono (DSc, %) da fração MOAM da MOS em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) para doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nos períodos avaliados: Tempo 0, ANO 1, ANO 2 e ANO 3. Os valores em porcentagem (%) para GRc e DSc são apresentados nas barras.



A aplicação de doses crescentes de cama de aviário promoveu o aumento progressivo dos estoques de nitrogênio no solo, sendo a fração MOAM o principal reservatório em todas as profundidades analisadas (Figura 8).

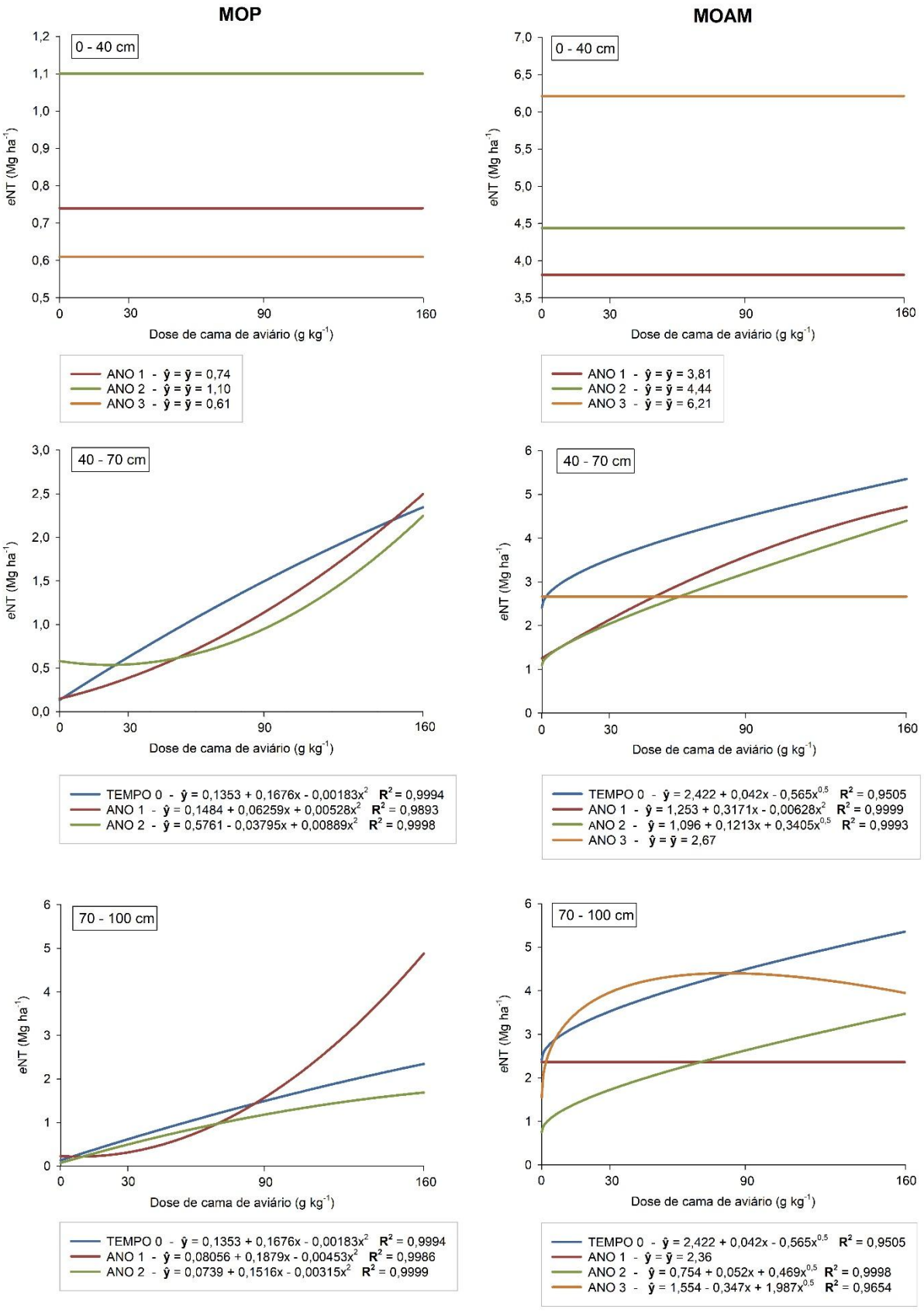
Na camada de 0-40 cm, com ausência de adição de CA, tanto a fração MOP quanto MOAM apresentaram estoques constantes ao longo dos anos, sugerindo que as doses aplicadas não exerceram efeito indireto sobre o estoque de nitrogênio superficial. Os valores médios para a fração MOP variaram de 0,74 Mg ha^{-1} no ANO 1, para 1,10 Mg ha^{-1} no ANO 2 e 0,61 Mg ha^{-1} no ANO 3, indicando incremento de 48,6% do primeiro para o segundo ano, seguido de redução de 44,5% do segundo para o terceiro ano. Enquanto que para a fração MOAM, também houve padrão constante, mas com estoques superiores e aumento ao longo dos anos, variando de 3,81 Mg ha^{-1} (ANO 1), 4,44 Mg ha^{-1} (ANO 2), até 6,21 Mg ha^{-1} no ANO 3.

Na profundidade de 40-70 cm, ambas as frações (MOP e MOAM) apresentaram comportamento semelhante: os maiores estoques foram registrados no Tempo 0 para todas as doses de cama de aviário, enquanto ANO 1 e ANO 2 tiveram decréscimos pouco expressivos, mantendo valores próximos entre si. Apesar disso, a fração MOAM manteve-se com estoques mais elevados. No ANO 3, os estoques da fração MOAM nesta profundidade permaneceram constantes (2,67 Mg ha^{-1}), evidenciando redução significativa na dose máxima de cama de aviário em relação ao Tempo 0 (5,35 Mg ha^{-1}).

Na camada mais profunda (70-100 cm), na fração MOP, destaca-se o ANO 2, em que o maior estoque foi observado na dose mais elevada (160 g kg^{-1}, 4,84 Mg ha^{-1}), enquanto nos demais períodos (Tempo 0 e ANO 1), os estoques na mesma dose permaneceram em torno de 2 Mg ha^{-1}. Para a fração MOAM, os estoques foram consistentemente superiores aos da MOP em todos os anos, com tendência de queda do Tempo 0 para o ANO 1, seguida de aumento nos anos subsequentes, de modo que o ANO 3 atingiu valores equivalentes ao Tempo 0.

Os estoques de nitrogênio referentes ao ANO 3 da fração MOP, nas camadas de 40-70 cm e 70-100 cm não foram determinados devido a problemas amostrais.

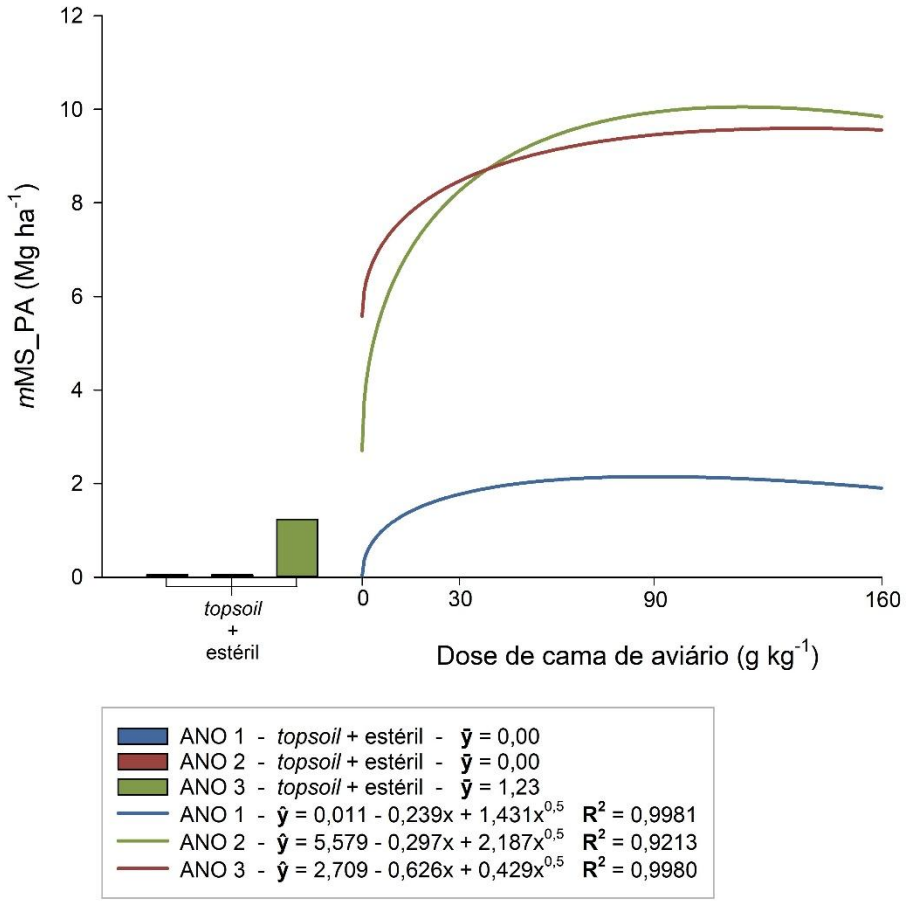
Figura 8. Estoque de nitrogênio total (*e*NT, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e MOAM da matéria orgânica do solo em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) em resposta de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nos períodos avaliados: Tempo 0, ANO 1, ANO 2 e ANO 3. Os modelos ajustados correspondentes a média em razão do valor constante ($\hat{y} = \bar{y}$), assim como os modelos ajustados e os coeficientes de determinação para as curvas de regressão ($\hat{y}$ e R^2, respectivamente), estão apresentados na legenda.


MOP
MOAM
0 - 40 cm
eNT (Mg ha-1)
Dose de cama de aviário (g kg-1)
ANO 1 - ŷ = ȳ = 0,74
ANO 2 - ŷ = ȳ = 1,10
ANO 3 - ŷ = ȳ = 0,61
ANO 1 - ŷ = ȳ = 3,81
ANO 2 - ŷ = ȳ = 4,44
ANO 3 - ŷ = ȳ = 6,21
40 - 70 cm
TEMPO 0 - ŷ = 0,1353 + 0,1676x - 0,00183x2 R2 = 0,9994
ANO 1 - ŷ = 0,1484 + 0,06259x + 0,00528x2 R2 = 0,9893
ANO 2 - ŷ = 0,5761 - 0,03795x + 0,00889x2 R2 = 0,9998
TEMPO 0 - ŷ = 2,422 + 0,042x - 0,565x0,5 R2 = 0,9505
ANO 1 - ŷ = 1,253 + 0,3171x - 0,00628x2 R2 = 0,9999
ANO 2 - ŷ = 1,096 + 0,1213x + 0,3405x0,5 R2 = 0,9993
ANO 3 - ŷ = ȳ = 2,67
70 - 100 cm
TEMPO 0 - ŷ = 0,1353 + 0,1676x - 0,00183x2 R2 = 0,9994
ANO 1 - ŷ = 0,08056 + 0,1879x - 0,00453x2 R2 = 0,9986
ANO 2 - ŷ = 0,0739 + 0,1516x - 0,00315x2 R2 = 0,9999
TEMPO 0 - ŷ = 2,422 + 0,042x - 0,565x0,5 R2 = 0,9505
ANO 1 - ŷ = ȳ = 2,36
ANO 2 - ŷ = 0,754 + 0,052x + 0,469x0,5 R2 = 0,9998
ANO 3 - ŷ = 1,554 - 0,347x + 1,987x0,5 R2 = 0,9654

6.2. Dose de máxima eficiência econômica para a produção de massa de matéria seca de parte aérea da braquiária

A produção de massa de matéria seca da parte aérea da braquiária (*m*MS_PA) apresentou padrão contrastante de resposta às doses de cama de aviário para os três anos de avaliação, aumentando em resposta ao acréscimo de cama de aviário (Figura 9).

Figura 9. Produção de massa de matéria seca da parte aérea (*m*MS_PA, Mg ha^{-1}) de braquiária normalizada para 100 dias em três anos consecutivos de avaliação (ANO 1, ANO 2 e ANO3) em função de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90 e 160 g kg^{-1}). As barras indicam a produção da parcela contendo o tratamento com o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) para cada ano avaliado. Os modelos ajustados e coeficientes de determinação para as curvas de regressão ($\hat{y}$ e R^2, respectivamente), assim como as médias das barras ($\bar{y}$) estão apresentadas na legenda.



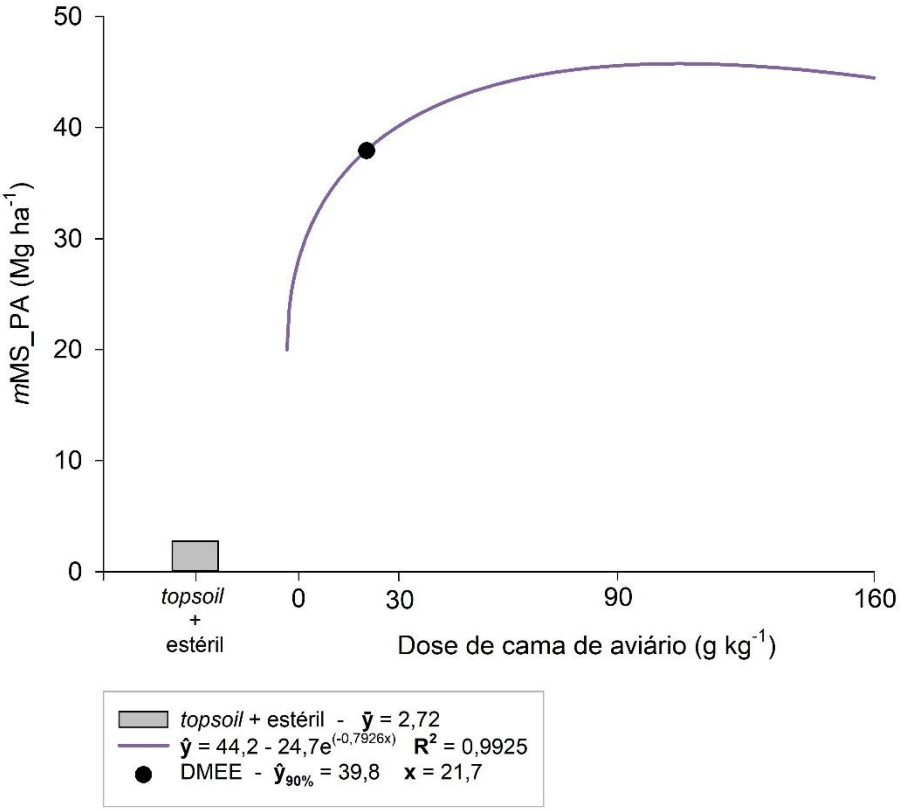
A parcela contendo o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) apresentou produção de 0 Mg ha^{-1} nos dois primeiros anos e apenas no terceiro ano atingiu a produção de 1,23 Mg ha^{-1}, valor inferior aos tratamentos contendo cama de aviário e até mesmo ao tecno-solo sem adição de cama de aviário para os anos 2 e 3.

No ANO 1, observou-se que o acréscimo da cama de aviário proporcionou produções de *m*MS_PA significativamente superiores ao controle (0 g kg^{-1} CA), sendo possível observar incrementos mais acentuados até a proporção de 30 g kg^{-1} CA seguido por efeito platô nas doses superiores, atingindo aproximadamente 2 Mg ha^{-1} para as maiores doses de CA. O ANO 2 e ANO 3 apresentaram comportamentos similares e superiores ao ANO 1, com produções máximas alcançando cerca de 10 Mg ha^{-1}, representando um aumento de 400 % da produtividade.

A produção acumulada de *m*MS_PA da braquiária avaliada no período de 840 dias (Figura 10) apresentou padrão consistente com os resultados observados nos anos individualmente (Figura 9), evidenciando produção inferior no tratamento sem cama de aviário em relação aos tratamentos que receberam o resíduo orgânico.

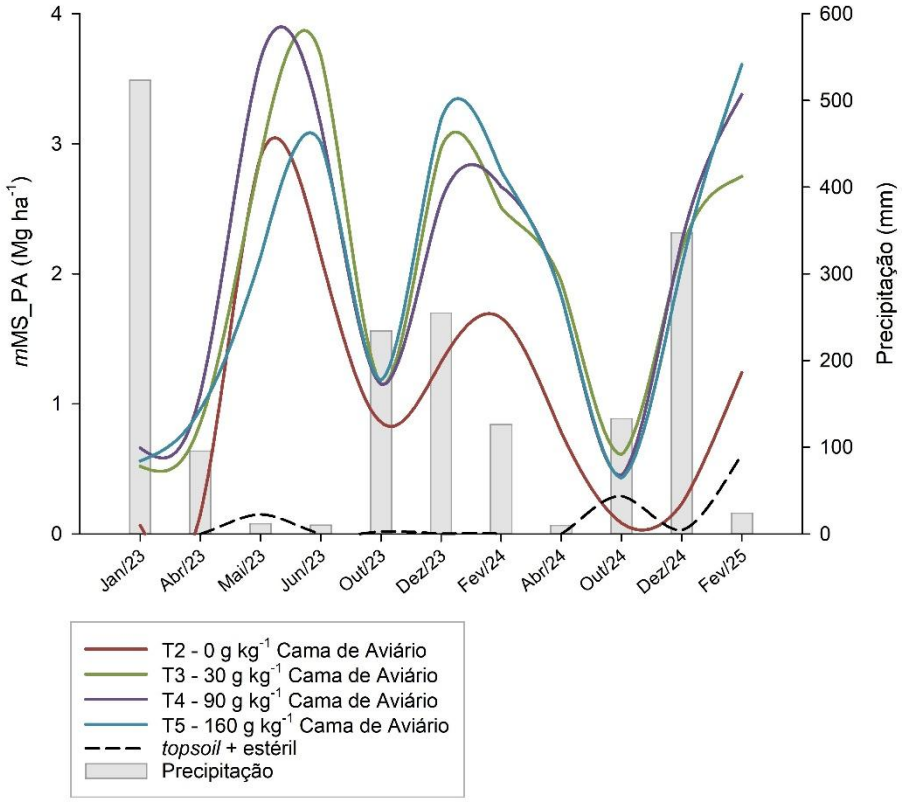
O padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) manteve desempenho drasticamente inferior aos tecno-solos, mesmo ao tratamento não enriquecido com cama de aviário. A análise do modelo de regressão ajustado aos dados permitiu estimar a dose de máxima eficiência econômica (DMEE) em 21,7 g kg^{-1} de cama de aviário, valor no qual se atinge 90% da produção de máxima eficiência física (39,8 Mg ha^{-1}). Doses superiores a esse limiar não proporcionam aumento significativo na produção de *m*MS_PA, indicando tendência de estabilização da resposta produtiva.

Figura 10. Produção de massa de matéria seca da parte aérea (*m*MS_PA, Mg ha^{-1}) de braquiária acumulada no período de 840 dias de avaliação em função de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90 e 160 g kg^{-1}). A barra indica a produção da parcela contendo o tratamento com o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) para o mesmo período. O modelo ajustado e coeficiente de determinação para a curvas de regressão ($\hat{y}$ e R^2, respectivamente), assim como a dose de máxima eficiência econômica (DMEE) estão apresentados na legenda.



A produção de *m*MS_PA da braquiária ao longo do período estudado respondeu positivamente às doses crescentes de cama de aviário, onde os tratamentos contendo cama de aviário nas proporções 30, 90 e 160 g kg^{-1} apresentaram valores superiores ao tratamento controle (0 g kg^{-1} CA) e ainda maiores em relação ao padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) (Figura 11). Os picos de produção ocorreram em períodos com maior precipitação. A produtividade da parcela contendo *topsoil* + estéril apresenta valores consistentemente inferiores em todo o período, com produtividade nula em alguns intervalos. Os tratamentos com acréscimo de CA se mantêm com pequenas diferenças entre eles durante todo o período (Figura 11).

Figura 11. Produção de massa de matéria seca da parte aérea (*m*MS_PA, Mg ha^{-1}) ao longo do tempo, em meses, para cada tratamento (T2: 0, T3: 30, T4: 90 e T5: 160 g kg^{-1}) e para a parcela contendo o tratamento com o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril). As barras apresentam a precipitação acumulada (mm) para cada mês avaliado.



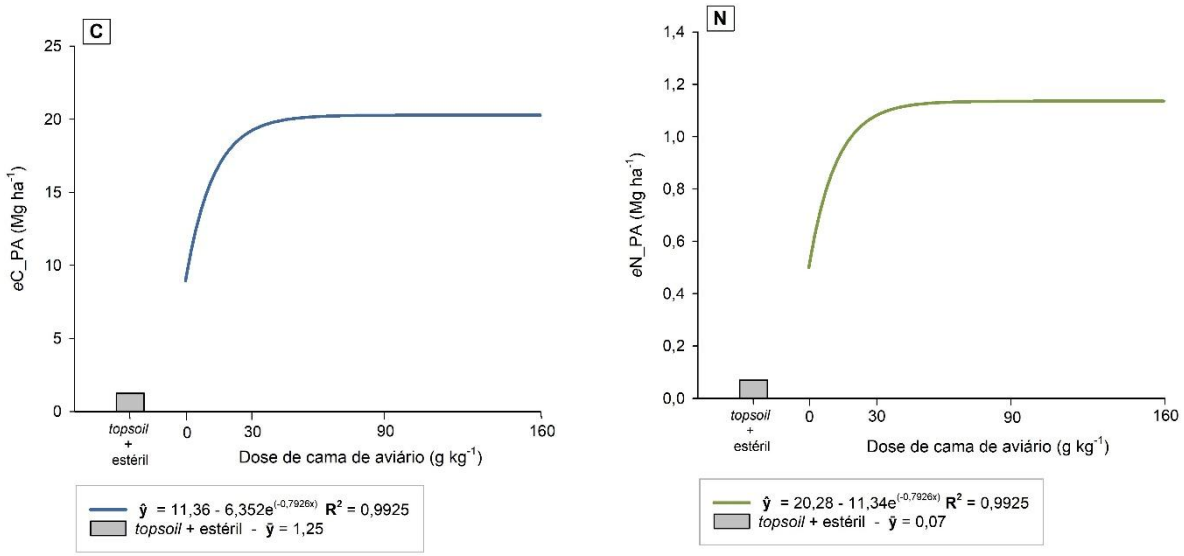
6.3. Estoque de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca da parte aérea da braquiária

As doses crescentes de cama de aviário promoveram acréscimo exponencial nos estoques de C e N acumulados na massa de matéria seca da parte aérea da braquiária (Figura 12).

Para o C, verificou-se elevação de 5,0 Mg ha^{-1} na ausência de CA (0 g kg^{-1}) para um patamar de 11,35 Mg ha^{-1} atingido a partir de 90 g kg^{-1} de CA, indicando um aumento de 127 % no estoque do nutriente. O N seguiu comportamento similar, partindo de 0,48 Mg ha^{-1} e estabilizando-se em 1,1 Mg ha^{-1} em doses de CA superiores a 30 g kg^{-1}. Comparado ao padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril), que acumulou apenas 1,25 Mg ha^{-1} de C e 0,07 Mg ha^{-1} de N, os tecnos-solos acrescidos de CA elevaram os estoques desses nutrientes em 808,0 % e 585,7 %, respectivamente.

Figura 12. Estoque de carbono (*e*C_PA, Mg ha^{-1}) e nitrogênio (*e*N_PA, Mg ha^{-1}) na massa de matéria seca da parte aérea (*m*MS_PA) da braquiária em função das doses

de cama de aviário (0, 30, 90 e 160 g kg^{-1}). A barra indica a produção da parcela contendo o tratamento com o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril). Os modelos ajustados e coeficientes de determinação para as curvas de regressão (ŷ e R^2, respectivamente), assim como as médias das barras (ȳ) estão apresentadas na legenda.



Os teores de C na *m*MS_PA da braquiária mantiveram-se estáveis entre os tratamentos, com valores entre 457,40 g kg^{-1} (160 g kg^{-1}) e 460,35 g kg^{-1} (0 g kg^{-1}). O teor de N foi menor no tratamento controle (21,58 g kg^{-1}), seguido por incremento de 29,8 % na dose de 30 g kg^{-1} de cama de aviário (28,02 g kg^{-1}). Nas doses superiores, verificou-se decréscimo nos teores de nitrogênio, com 26,59 g kg^{-1} para 90 g kg^{-1} e 26,41 g kg^{-1} para 160 g kg^{-1}. A relação C/N apresentou seu valor mais elevado no tratamento controle (23,51). Nas doses 30, 90 e 160 g kg^{-1}, a adição de cama de aviário e consequente enriquecimento nutricional da braquiária ocasionou a redução dos valores da relação C/N, mantendo-se em patamares similares, com valores de 16,64, 17,69 e 17,94, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9. Concentração de carbono (*c*C_PA) e nitrogênio (*c*N_PA) e relação C/N na massa de matéria seca da parte aérea da braquiária em função de doses crescentes de cama de aviário (T2:0, T3:30, T4:90 e T5:160 g kg^{-1}).

Dose g kg^{-1}	***c*C_PA** ---- g kg^{-1}	***c*N_PA** ----	**Relação C/N**
0	460,35	21,58	23,51
30	457,48	28,02	16,64
90	457,88	26,59	17,69
160	457,40	26,41	17,94

6.4. Produção de massa de matéria seca de raiz da braquiária

A produção de *m*MS_R apresentou valores constantes para todas as profundidades analisadas e em ambas as coletas, revelando que o acréscimo de cama de aviário não exerceu influência significativa na produção de raízes (Figura 13).

No ANO 2, observou-se decréscimo gradual e acentuado da *m*MS_R com o aumento da profundidade, com 1,57 Mg ha^{-1} na camada superficial (0-40 cm) referente ao *topsoil*, 1,27 Mg ha^{-1} na camada intermediária (40 – 70 cm) e 1,15 Mg ha^{-1} na camada mais profunda (70 – 100 cm), indicando uma distribuição uniforme do sistema radicular no perfil do solo com pequena redução, de cerca de 19% e 27% nas profundidades 40-70 e 70-100 cm, respectivamente, em relação a profundidade 0-40 cm.

No ANO 3, a distribuição das raízes no perfil apresentou alteração. A camada de *topsoil* (0-40 cm) atingiu 4,01 Mg ha^{-1}, representando um incremento de 155% na produção de *m*MS_R em relação ao ANO 2. Já as profundidades de 40-70 e 70-100 cm sofreram redução de 75% (0,32 Mg ha^{-1}) e 63% (0,43 Mg ha^{-1}) na produtividade de *m*MS_R, respectivamente.

Houve mudanças na alocação da massa de matéria seca da braquiária dos compartimentos da planta em relação aos anos avaliados. No ANO 2, observou-se que a relação *m*MS_R/*m*MS_PA é constante (2,36) entre as doses de CA e mais elevada quando comparada ao ANO 3, indicando que a planta investiu mais na produção de *m*MS_R.

Já no ANO 3 essa relação diminui conforme aumentaram as doses de cama de aviário. No tratamento controle (0 g kg^{-1} CA) a relação manteve-se elevada em um valor maior do que no ANO 2, e decresceu drasticamente para valores próximos a 0,4 para as demais doses, representando uma redução de aproximadamente 85% em relação ao tratamento controle. Essas relações do ANO 3 são observadas em resposta ao incremento superior de *m*MS_R do tratamento controle, principalmente na camada 0-40 cm, assim como no investimento em *m*MS_PA dos demais tratamentos (Figura 14).

Figura 13. Produção de massa de matéria seca de raiz (*m*MS_R, Mg ha^{-1}) da braquiária nas profundidades 0-40, 40-70 e 70-100 cm em função das doses de cama de aviário (0, 30, 90 e 160 g kg^{-1}) para o ANO 2 e ANO 3. Os modelos ajustados

correspondentes as médias em razão do valor constante (ŷ = ȳ) estão apresentados na legenda.

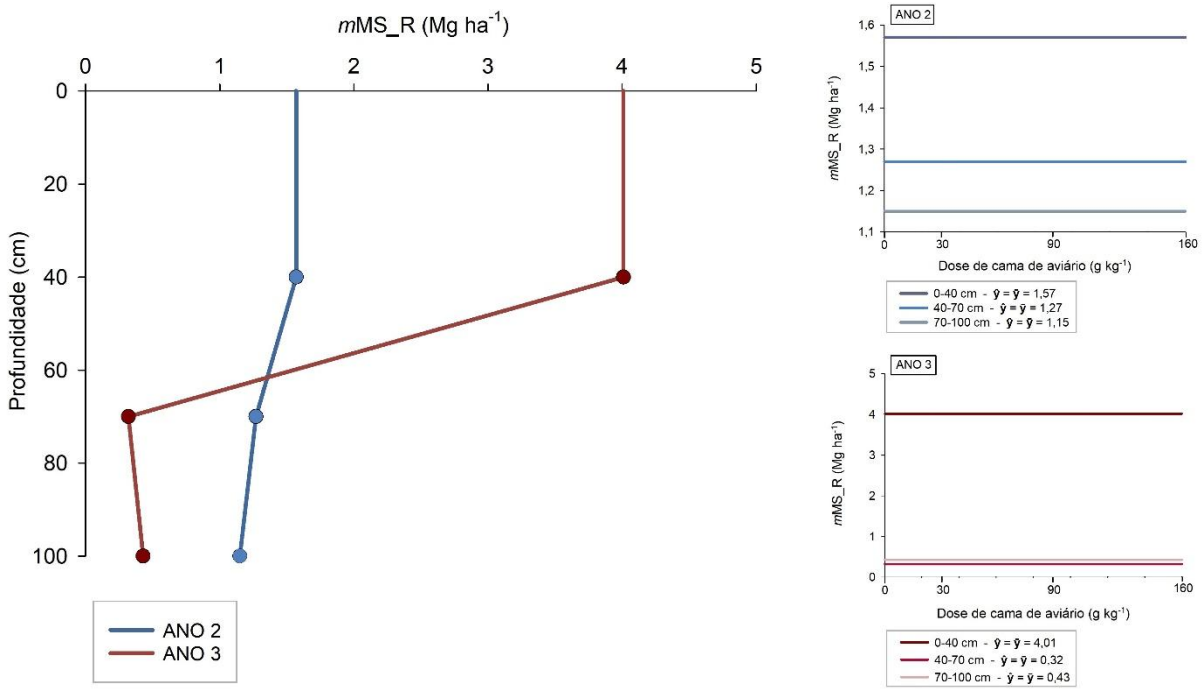
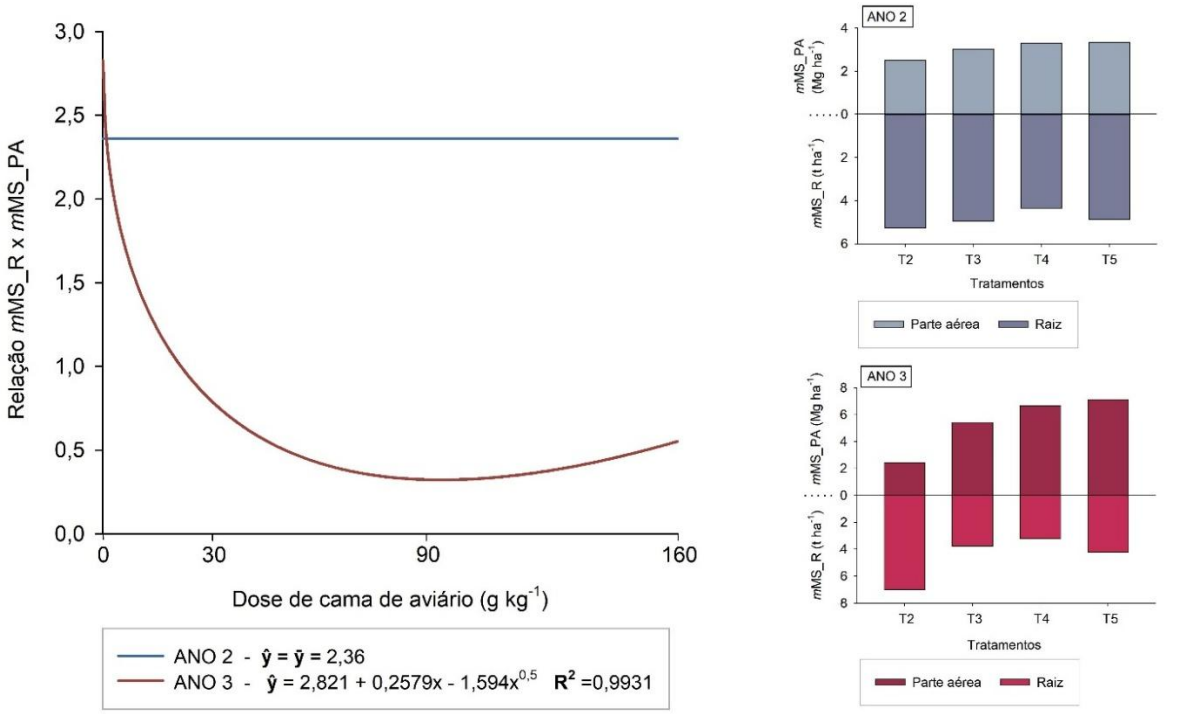


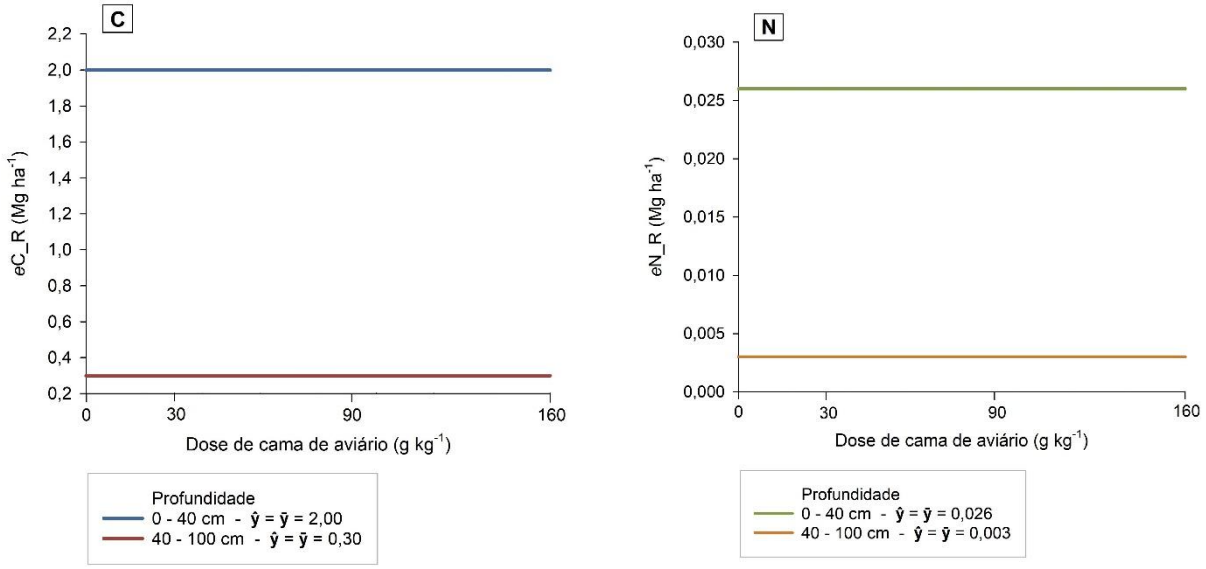
Figura 14. Relação entre a produção de massa de matéria seca de raiz (*m*MS_R, Mg ha^{-1}) e a produção de massa de matéria seca de parte aérea (*m*MS_PA, Mg ha^{-1}) da braquiária em função das doses de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) para o ANO 2 e ANO 3. O modelo ajustado correspondente a média em razão do valor constante da ANO 2 (ŷ = ȳ), assim como o modelo ajustado e o coeficiente de determinação para a curva de regressão da ANO 3 (ŷ e R^2, respectivamente), estão apresentados na legenda.



6.5. Estoque de carbono e nitrogênio da massa de matéria seca de raiz da braquiária

A constância nos estoques de C e N da massa de matéria seca de raiz pode ser observada na figura 15. O estoque de N na *m*MS_R é superior na profundidade de 0-40 cm, referente ao *topsoil*, em relação a profundidade de 40-70 cm, com valor médio de 0,026 Mg ha^{-1} e 0,003 Mg ha^{-1}, respectivamente. O estoque de C na *m*MS_R segue um padrão semelhante ao do N, com valores mais elevados na camada superficial (2,0 Mg ha^{-1} em 0-40 cm) e menores em subsuperfície (0,30 Mg ha^{-1} em 40-100 cm). As médias dos valores de estoque de N e C implicam em redução de 766,6% e 566,6%, respectivamente, em relação as profundidades. Os valores são constantes para ambas as profundidades, indicando que não houve diferença nos estoques de N e de C em relação a adição de CA. A ausência de variação do estoque de N e C entre as doses de CA está associada aos valores constantes de *m*MS_R do ANO 3 e na pequena variação nos teores de N e C na biomassa radicular, que podem ser observadas na figura 14 e na tabela 11.

Figura 15. Estoque de nitrogênio (*e*N_R, Mg ha^{-1}) e carbono (*e*C_R, Mg ha^{-1}) na massa de matéria seca de raiz da braquiária (*m*MS_R) em resposta as doses de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nas profundidades 0-40 e 40-100 cm, referente ao ANO 3. O modelo ajustado correspondente a média em razão do valor constante (ŷ = ȳ) estão apresentados na legenda.



É possível verificar que a camada superficial (0-40 cm) apresentou influência das doses de cama de aviário sobre os teores de carbono e nitrogênio na massa de matéria seca radicular (Tabela 10). Os teores de carbono foram reduzidos com o incremento das doses de cama de aviário, variando de 51,57 g kg^{-1} (0 g kg^{-1}) a 49,33 g kg^{-1} (160 g kg^{-1}), representando decréscimo de 4,3%.

Na camada subsuperficial (40-100 cm), os teores de carbono mantiveram-se em patamares ligeiramente superiores em comparação à camada superficial, apresentando intervalo de valores entre 50,67 g kg^{-1} (30 g kg^{-1}) e 52,43 g kg^{-1} (0 g kg^{-1}), com variação de apenas 3,5%. Para o nitrogênio, na camada superficial, observou-se incremento de 100% ao comparar o controle (0,45 g kg^{-1}) ao tratamento de maior dose (0,90 g kg^{-1} em 160 g kg^{-1}). A elevação no teor do nutriente na raiz também foi observada na camada de 40-100 cm em relação à adição de cama de aviário nos tratamentos, verificando-se aumento de 58,3%, com valor inferior no controle (0,48 g kg^{-1}) e superior na dose de 160 g kg^{-1} (0,76 g kg^{-1}).

A relação C/N apresentou valores consideravelmente mais elevados no sistema radicular comparado à parte aérea, com destaque para o tratamento controle que registrou 115,87 (0-40 cm) e 108,67 (40-70 cm). A adição de cama de aviário promoveu aumento dos teores de nitrogênio na biomassa radicular, ocasionando redução da relação C/N em 52,7% na camada superficial e 28,8% na camada msubsuperficial.

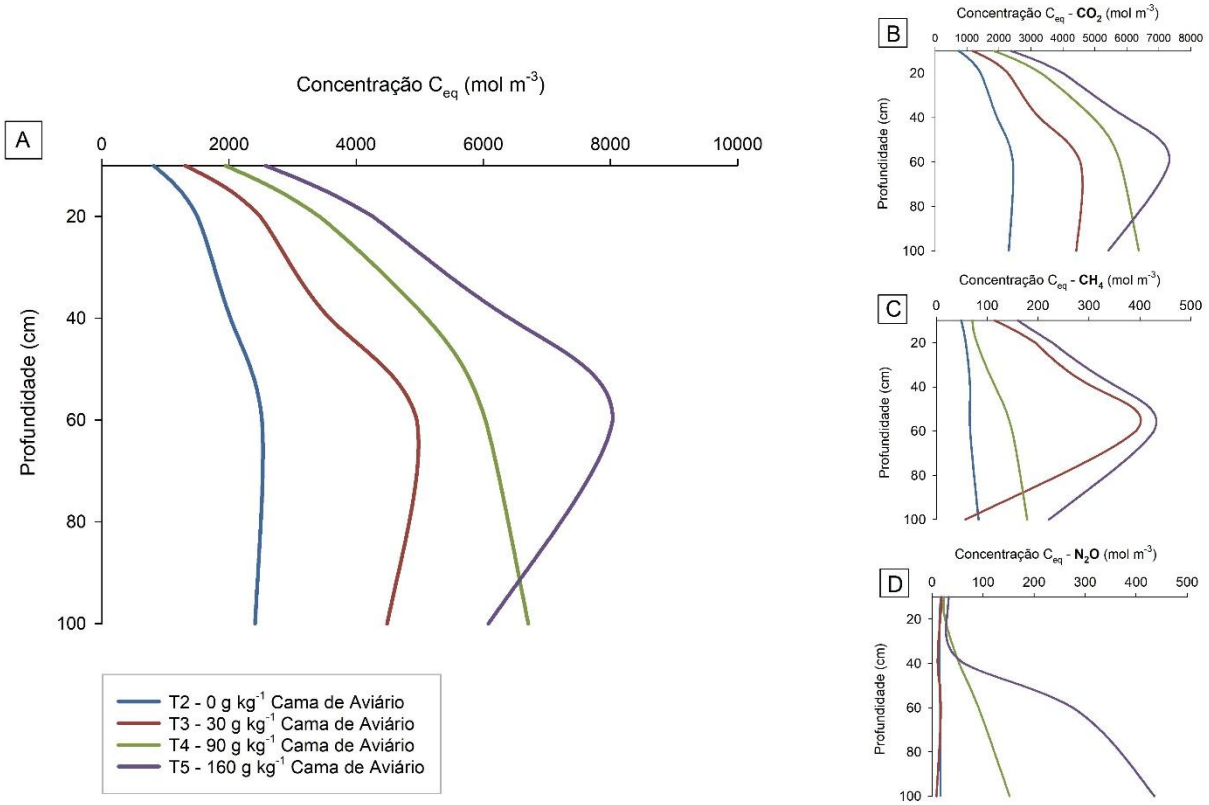
Tabela 10. Concentração de carbono (*c*C_R) e nitrogênio (*c*N_R) e relação C/N na massa de matéria seca da raiz da braquiária em função de doses crescentes de cama de aviário (T2:0, T3:30, T4:90 e T5:160 g kg^{-1}).

	0-40 cm		
Dose g kg^{-1}	***c*C_R** ---- g kg^{-1} ----	***c*N_R**	**Relação C/N**
0	51,57	0,45	115,87
30	47,37	0,46	103,82
90	49,89	0,97	51,67
160	49,33	0,90	54,82
	40-100 cm		
Dose g kg^{-1}	***c*C_R** ---- g kg^{-1} ----	***c*N_R**	**Relação C/N**
0	52,43	0,48	108,67
30	50,67	0,75	67,61
90	52,11	0,74	70,64
160	51,38	0,76	77,36

6.6. Concentração dos gases de efeito estufa no solo em profundidade

A dose de 160 g kg^{-1} de CA resulta as maiores concentrações de GEEs em todo o perfil (10-100 cm), seguido pelas doses 90 > 30 > 0 g kg^{-1} (Figura 16). No painel principal (A), observa-se que o somatório das concentrações dos GEEs aumentou com a elevação das doses de cama de aviário ao longo de todo o perfil, exibindo concentração inferior na camada superficial (10-40 cm), seguida por um acréscimo gradual até as camadas intermediárias (40-70 cm) e sofrendo acentuado decréscimo nas camadas mais profundas (70-100 cm). A análise individual dos gases (painéis B, C e D) evidencia que o CO_2 foi o principal contribuinte na concentração total, seguido pelo CH_4 e, por último, pelo N_2O. O CO_2 e CH_4 apresentaram comportamento semelhante ao somatório total ao longo do perfil. Já o N_2O, assim como os demais, respondeu ao aumento das doses, mas ainda mostrou uma resposta mais pronunciada da dose de 160 g kg^{-1} CA em camadas mais profundas.

Figura 16. Concentração de gases de efeito estufa (GEEs) em valores de carbono equivalente (C_{eq}, mol m^{-3}) ao longo do perfil do solo (10-100 cm) para os tratamentos com diferentes doses de cama de aviário: T2 (0 g kg^{-1}), T3 (30 g kg^{-1}), T4 (90 g kg^{-1}) e T5 (160 g kg^{-1}). O painel principal (A) apresenta o somatório da concentração dos gases CO_2, CH_4 e N_2O, em C_{eq}. Os painéis menores detalham a participação individual dos gases CO_2 (B), CH_4 (C) e N_2O (D), em C_{eq}.



6.7. Fluxo de gases de efeito estufa (CO_2, CH_4, N_2O) e acumulado

O fluxo dos gases CO_2, CH_4 e N_2O foi intensificado com a adição de cama de aviário, sendo o CO_2 aquele que apresentou maiores valores (até 500 mg h^{-1} m^{-2}) – Figura 17. Em relação ao CO_2, observou-se predominantemente o efluxo em ambos os tratamentos, sendo consistentemente maior na dose de 90 g kg^{-1} CA. Ainda, o fluxo foi influenciado pela precipitação, com maiores emissões nos períodos chuvosos (dezembro/2022 a fevereiro/2023 e outubro/2023 a fevereiro/2025) e redução nos meses mais secos (março/2023 a setembro/2023). Para o CH_4, predomina o influxo em ambos os tratamentos. Os maiores fluxos do tratamento controle (0 g kg^{-1} CA) ocorreram no período seco, enquanto aqueles resultantes da adição de cama de aviário na dose de 90 g kg^{-1} ocorreram no período chuvoso. Já o N_2O apresentou alta variabilidade o longo do tempo em ambos os tratamentos, alternando entre fluxo e influxo, sem influência evidente da precipitação. Em grande parte do período estudado (novembro/2022 a maio/2023 e novembro/2023) verificou-se que os fluxos de N_2O apresentaram comportamento oposto entre os tratamentos, ou seja, nos momentos

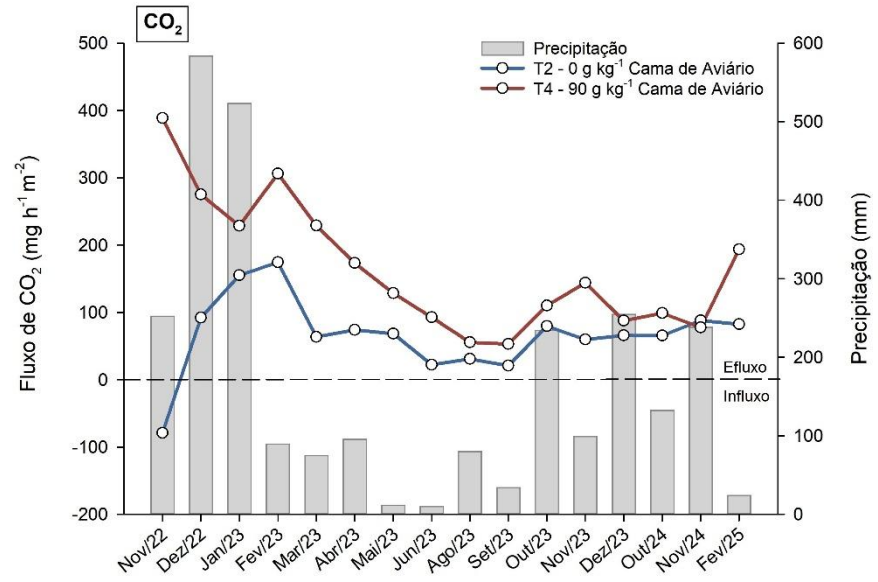
em que o tratamento controle (0 g kg^{-1} CA) apresentou redução, o tratamento com adição de cama de aviário (90 g kg^{-1}) apresentou elevação, e vice-versa.

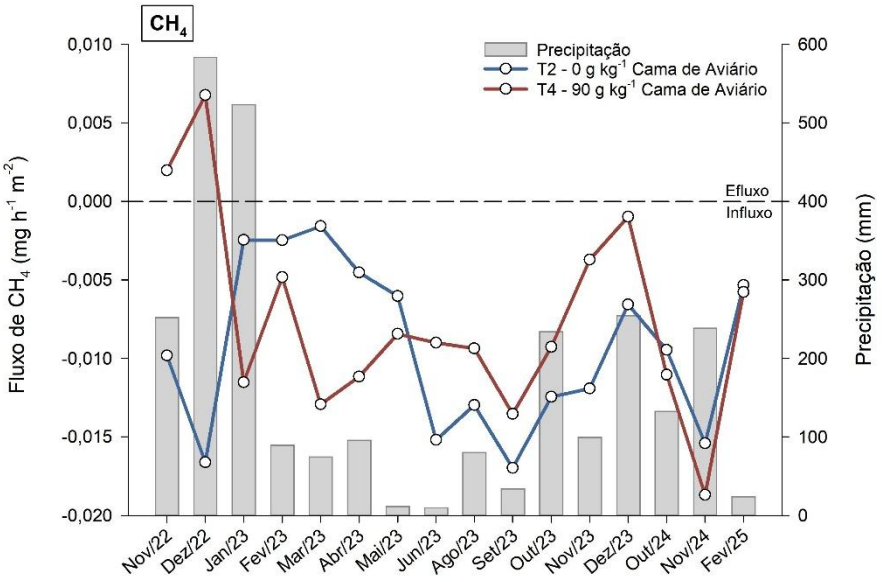
A aplicação de cama de aviário intensifica as emissões totais acumuladas de GEEs, como é possível verificar na figura 18. A dose de 90 g kg^{-1} CA apresentou emissão total acumulada superior (9,9 Mg ha^{-1}) ao tratamento controle (0 g kg^{-1} CA), que resultou 3,9 Mg ha^{-1} de C_{eq}, representando um aumento de 146,1 % da emissão.

A compartimentação da contribuição individual dos gases demonstrou que o CO_2 foi o principal contribuinte pelas emissões em ambos os tratamentos, representando 98,8 % na dose de 90 g kg^{-1} e 97 % na dose de 0 g kg^{-1} da emissão total acumulada. Quando adicionada a cama de aviário (90 g kg^{-1}), o CO_2 contribuiu com a emissão de 9,78 Mg ha^{-1} de C_{eq}, valor estatisticamente superior aos 3,97 Mg ha^{-1} emitidos no tratamento controle, representando um aumento de 146,3 % nas emissões de CO_2 em resposta a aplicação de cama de aviário.

Em contrapartida, o CH_4 apresentou influxo em ambos os tratamentos, onde os valores de -0,011 Mg ha^{-1} (90 g kg^{-1}) e – 0,017 Mg ha^{-1} (0 g kg^{-1}) de C_{eq} não diferiram entre si. Quanto ao N_2O, sua contribuição para as emissões totais acumuladas foi minoritária. Embora tenha ocorrido um aumento de 1230 % das emissões no tratamento com acréscimo de cama de aviário (90 g kg^{-1} = 0,133 Mg ha^{-1}) em comparação ao controle (0 g kg^{-1} = 0,010 Mg ha^{-1}), não ocorreu diferença estatística pelo teste Tukey a 10% de significância.

Figura 17. Fluxo de gases de efeito estufa: CO_2, CH_4 e N_2O (mg h^{-1} m^{-2}) ao longo do tempo (novembro/2022 a fevereiro/2025) para os tratamentos T2 (0 g kg^{-1} CA) e T4 (90 g kg^{-1} CA). As barras cinzas representam a precipitação acumulada (mm) para cada mês do período. A linha tracejada horizontal indica o ponto zero entre o efluxo e o influxo dos gases.


CO2
Precipitação
T2 - 0 g kg-1 Cama de Aviário
T4 - 90 g kg-1 Cama de Aviário
Fluxo de CO2 (mg h-1 m-2)
Precipitação (mm)
Efluxo
Influxo
500
400
300
200
100
0
-100
-200
600
500
400
300
200
100
0
Nov/22
Dez/22
Jan/23
Fev/23
Mar/23
Abr/23
Mai/23
Jun/23
Ago/23
Set/23
Out/23
Nov/23
Dez/23
Out/24
Nov/24
Fev/25


CH4
Precipitação
T2 - 0 g kg-1 Cama de Aviário
T4 - 90 g kg-1 Cama de Aviário
Fluxo de CH4 (mg h-1 m-2)
Precipitação (mm)
Efluxo
Influxo
0,010
0,005
0,000
-0,005
-0,010
-0,015
-0,020
600
500
400
300
200
100
0
Nov/22
Dez/22
Jan/23
Fev/23
Mar/23
Abr/23
Mai/23
Jun/23
Ago/23
Set/23
Out/23
Nov/23
Dez/23
Out/24
Nov/24
Fev/25

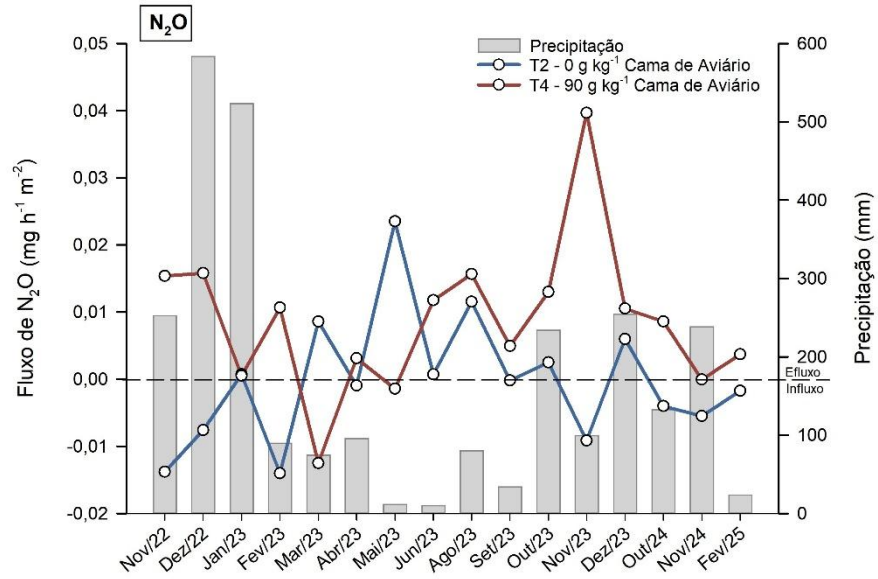
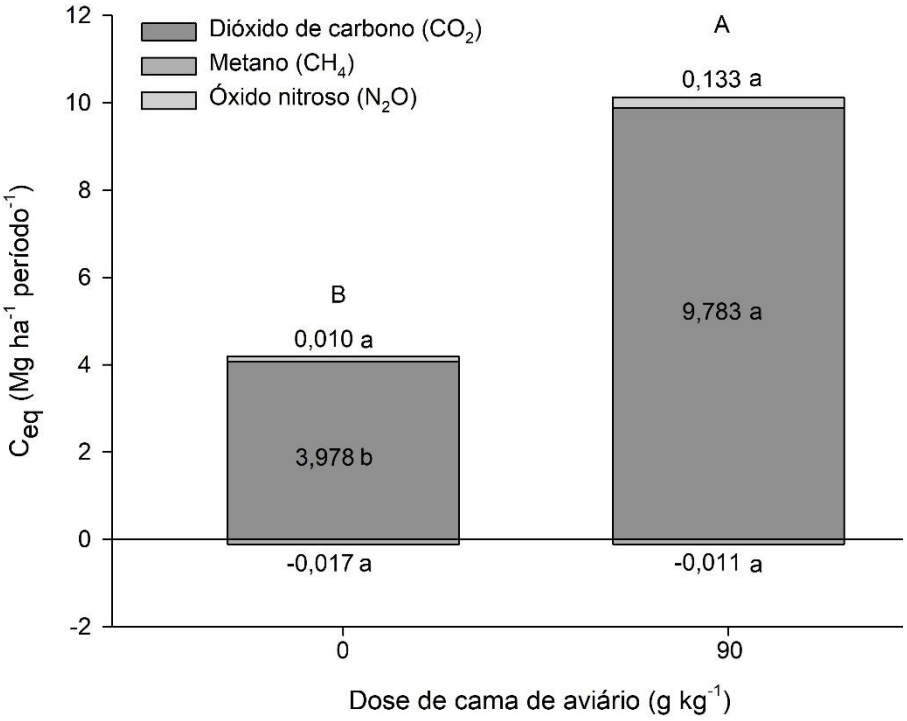

N2O
Precipitação
T2 - 0 g kg-1 Cama de Aviário
T4 - 90 g kg-1 Cama de Aviário
Fluxo de N2O (mg h-1 m-2)
Precipitação (mm)
Efluxo
Influxo
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0,00
-0,01
-0,02
600
500
400
300
200
100
0
Nov/22
Dez/22
Jan/23
Fev/23
Mar/23
Abr/23
Mai/23
Jun/23
Ago/23
Set/23
Out/23
Nov/23
Dez/23
Out/24
Nov/24
Fev/25

Figura 18. Emissão acumulada dos gases de efeito estufa: CO_2, CH_4 e N_2O em carbono equivalente (C_{eq}, Mg ha^{-1}) para os tratamentos T2 (0 g kg^{-1} CA) e T4 (90 g kg^{-1} CA), discriminando a contribuição individual de cada gás ao total acumulado no período estudado de 764 dias. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre total acumulado e letra minúscula entre contribuição individuas dos gases não diferem pelo teste de Tukey a 10% de significância.

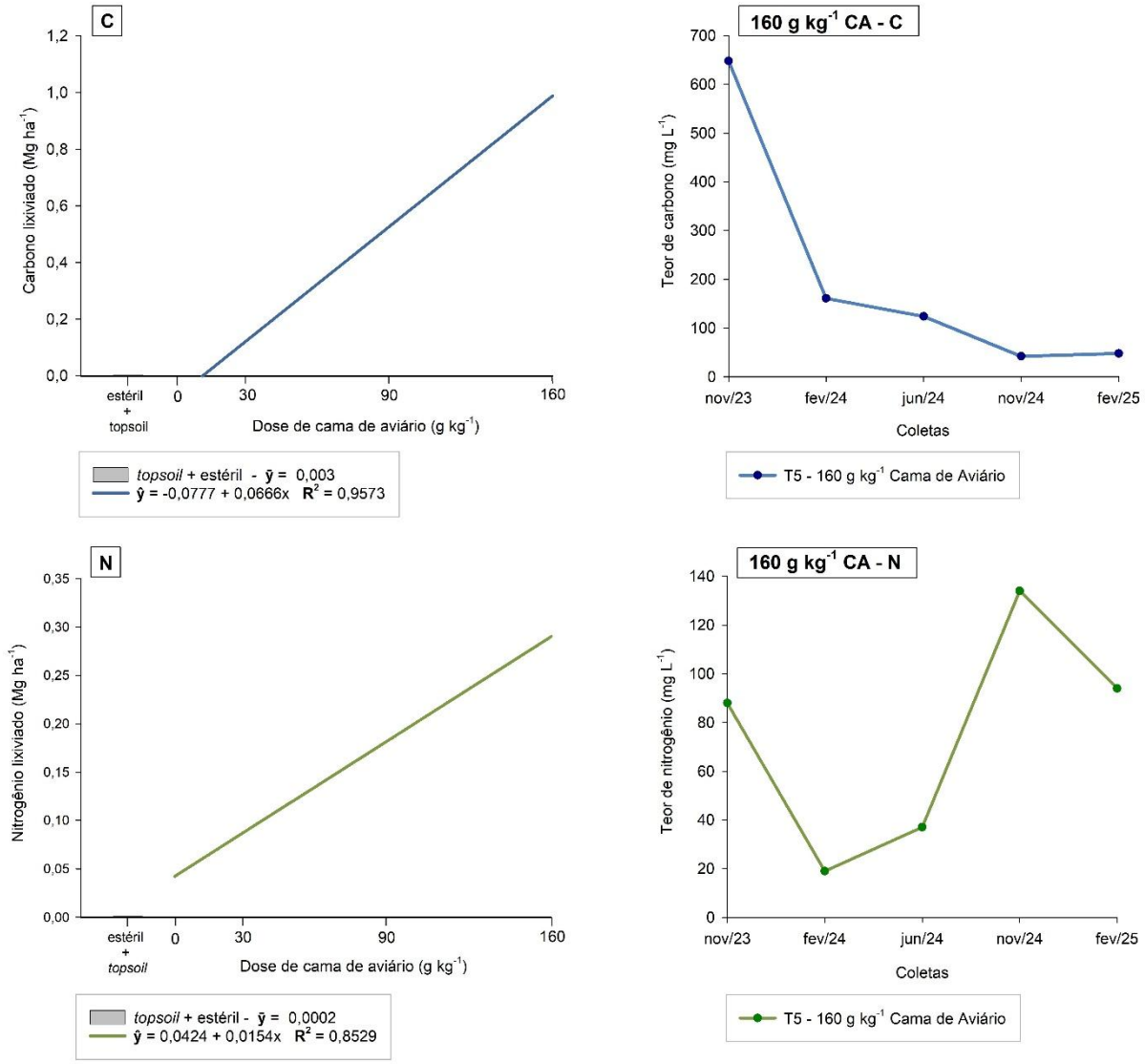


6.8. Teores de nitrato, amônio, fósforo inorgânico e carbono no lixiviado

O acréscimo de doses crescentes de cama de aviário resultou em variações significativas nos teores de C e N (Figura 19). Para o C e o N lixiviado, verificou-se relação linear positiva, demonstrando que o incremento de cada unidade percentual de cama de aviário promoveu o aumento da lixiviação em 0,066 Mg ha^{-1} e 0,015 Mg ha^{-1}, respectivamente.

Figura 19. Carbono (C) e nitrogênio (N) lixiviado (Mg ha^{-1}) em resposta de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) e teor de carbono (160 g kg^{-1} CA – C, g dm$_3^{-1}$) e nitrogênio (160 g kg^{-1} CA – N, g dm$_3^{-1}$) lixiviado ao longo do tempo (Coletas em: novembro/2023, fevereiro/2024, junho/2024, novembro/2024 e fevereiro/2025) na dose de 160 g kg^{-1}. As barras indicam o valor do nutriente lixiviado

da parcela contendo o tratamento com o padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril). Os modelos ajustados e os coeficientes de determinação para as curvas de regressão (ŷ e R^2, respectivamente), estão apresentados na legenda.



As barras referentes ao padrão atual de recuperação (*topsoil* + estéril) apresentam valores significativamente inferiores ao demais tratamentos, com menor diferença em relação ao tratamento controle (0 g kg^{-1} CA), evidenciando que a adição de cama de aviário potencializou a mobilidade desses nutrientes no perfil do solo.

A avaliação dos teores de C lixiviado na dose de 160 g kg^{-1} de CA ao longo das coletas mostrou padrão decrescente, com concentração máxima na primeira coleta (novembro/2023) de 0,64 g dm^{-3}, seguido por reduções progressivas até valores de 0,05 g dm^{-3} na última coleta (fevereiro/2025). O teor de N apresentou concentrações iniciais de 0,08 g dm^{-3}, redução acentuada em fevereiro/2023 (0,02 g dm^{-3}), seguido

por um pico em novembro/2024 (0,13 g dm^{-3}) e nova redução na última coleta (0,094 g dm^{-3}).

A análise do volume de lixiviado coletado (Tabela 11) é fundamental para compreender a magnitude das perdas dos nutrientes, uma vez que o cálculo do total de nutrientes exportados resulta do produto entre o teor dos nutrientes e o volume de lixiviado. Há relação direta entre as doses de cama de aviário e o volume total da solução percolada no perfil do solo, com aumentos de 86% e 169% nas doses de 90 g kg^{-1} e 160 g kg^{-1}, respectivamente, em comparação ao controle (0 g kg^{-1}). Isso indica não apenas o aumento da disponibilidade de nutrientes passíveis de lixiviação, mas também a alteração das propriedades físico-hídricas do solo.

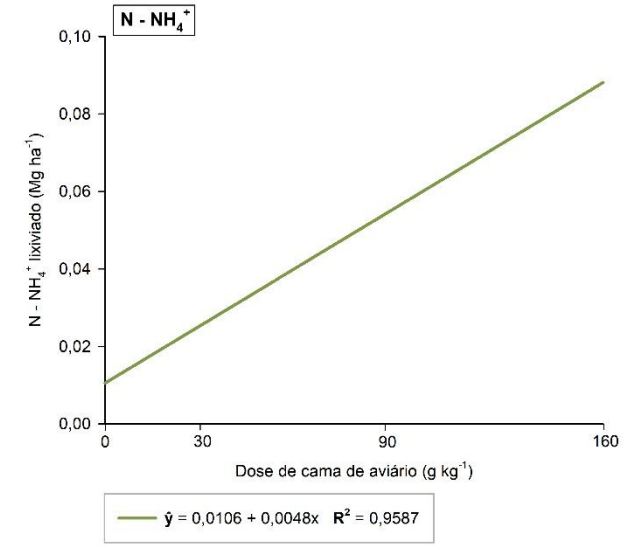
Tabela 11. Volume de lixiviado (m^3 ha^{-1}) coletado em função de doses crescentes de cama de aviário (T2:0, T3:30, T4:90 e T5:160 g kg^{-1}).

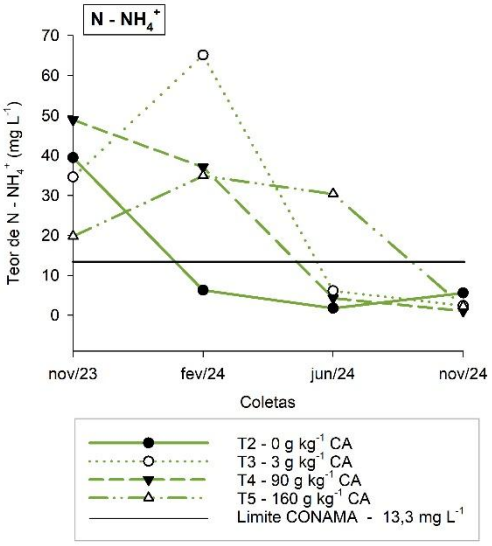
Dose g kg^{-1}	**Volume** m^3 ha^{-1}
0	347,92
30	342,36
90	647,22
160	936,53

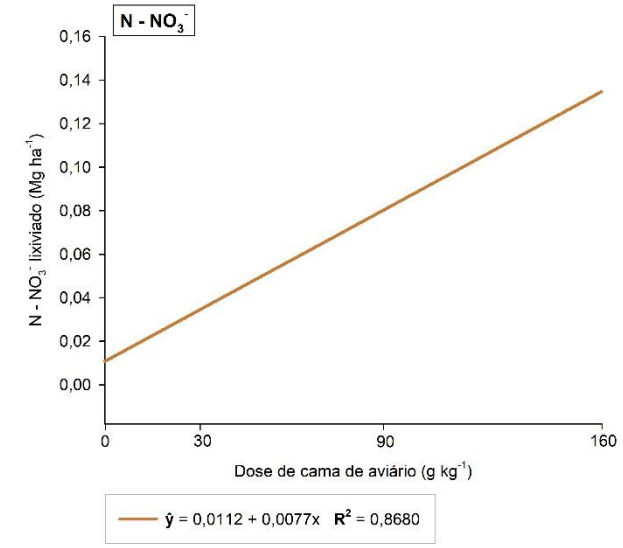
A lixiviação das formas de nitrogênio e fósforo em função da aplicação de doses de cama de aviário são apresentadas na figura 20. Para N-NH_4^+, N-NO_3^- e P observou-se relação linear positiva, evidenciando que o incremento percentual de cama de aviário promove aumento na lixiviação dessas formas de nitrogênio e fósforo na ordem de 0,0048 Mg ha^{-1} para N-NH_4^+, 0,0077 Mg ha^{-1} para N-NH_3^- e 0,000043 Mg ha^{-1} para P. Embora tenham apresentado a mesma relação linear positiva, a magnitude das perdas de fósforo por lixiviação foi menor em relação as formas de nitrogênio. Como também, a maior inclinação da curva de regressão para o nitrato (0,0077) em comparação ao amônio (0,0048) revela uma maior vulnerabilidade desta forma de nitrogênio às perdas por lixiviação.

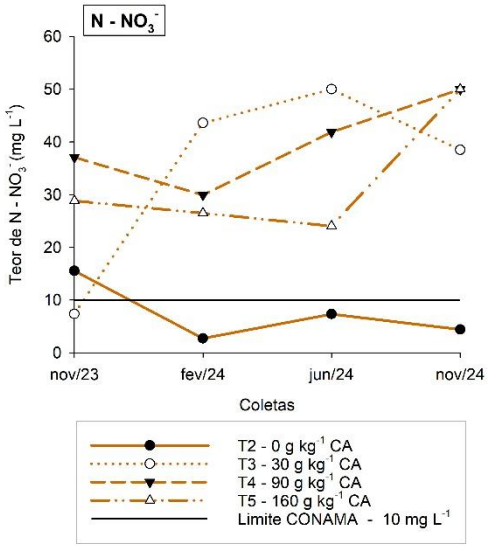
Figura 20. Lixiviação de nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+, Mg ha^{-1}), nitrogênio nítrico (N-NO_3^-, Mg ha^{-1}) e fósforo (P, Mg ha^{-1}) em resposta de doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) e teor de nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+, mg L^{-1}), nitrogênio nítrico (N-NO_3^-, mg L^{-1}) e fósforo (P, mg L^{-1}) lixiviado ao longo do tempo (Coletas em: novembro/2023, fevereiro/2024, junho/2024 e novembro/2024) para as doses 0, 30, 90, 160 g kg^{-1} de cama de aviário. Os modelos ajustados e os coeficientes

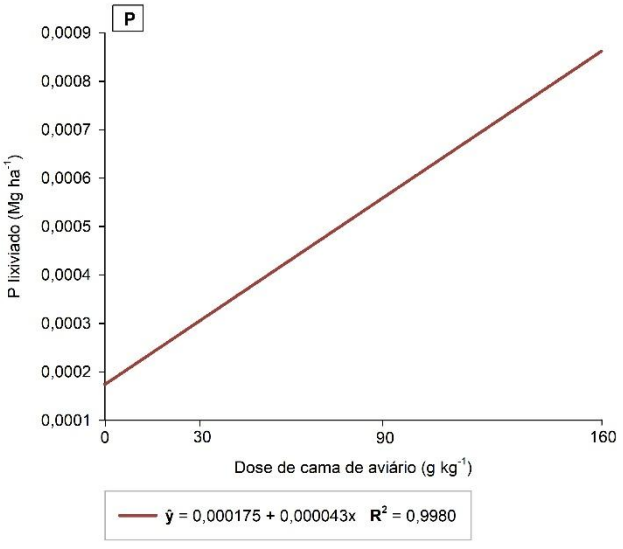
de determinação para as curvas de regressão (ŷ e R^2, respectivamente), estão apresentados na legenda.

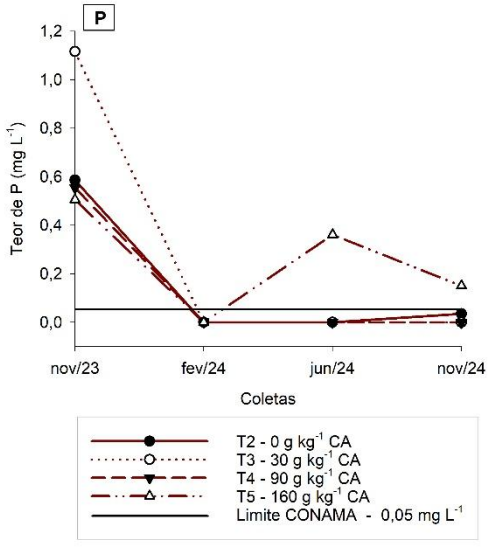












Os teores de $N\text{-}NH_4^+$, mostraram tendencia geral de redução ao longo do período avaliado, onde todos os tratamentos atingiram valores abaixo do limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005 (13,3 mg L^{-1}) na coleta final (nov/24). Para o $N\text{-}NH_3^-$, o tratamento controle (0 g kg^{-1} CA) manteve-se consistentemente próximo ou abaixo do limite estabelecido pela legislação (10 mg L^{-1}), especialmente após a primeira coleta, enquanto todos os demais tratamentos com adição de cama de aviário (30, 90 e 160 g kg^{-1}) apresentaram teores consistentemente acima do limite ao longo das coletas. Os teores de P de todos os tratamentos evidenciaram valores acima do limite CONAMA (0,05 mg L^{-1}) na primeira coleta (nov/23). Nas coletas subsequentes, todas as doses mantiveram-se dentro dos limites aceitáveis, exceto a maior dose de CA (160 g kg^{-1}).

É importante considerar que os lixiviados permaneceram armazenados entre os períodos de coleta, permitindo transformações bioquímicas que podem não ocorrer naturalmente durante a percolação direta para o lençol freático, o que pode ter influenciado os padrões observados.

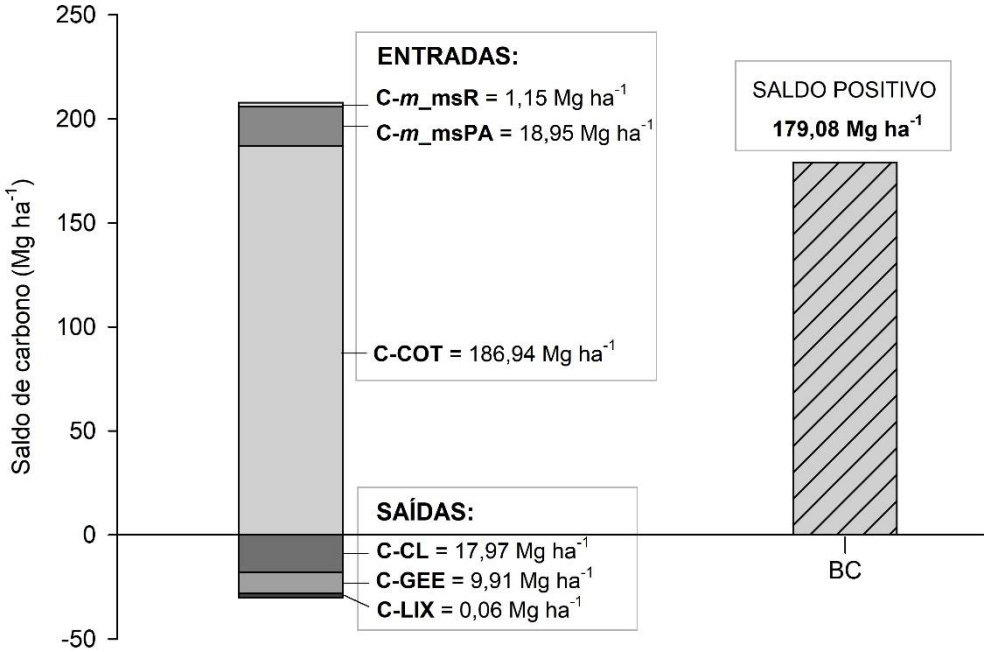
6.9. Balanço de carbono do sistema

O balanço de carbono no sistema apresenta saldo positivo de 179,08 Mg ha^{-1} para a dose de cama de aviário para máxima eficiência econômica (DMEE = 21,7 g kg^{-1}) de *m*MS_PA. (Figura 21).

As entradas de carbono totalizaram 207,04 Mg ha^{-1}, sendo compostas principalmente pelo estoque de carbono orgânico total (C-COT) de 186,94 Mg ha^{-1} nas frações MOP e MOAM nas profundidades de 0-40, 40-70 e 70-100 cm. O estoque de carbono na massa de matéria seca da parte aérea da braquiária (C-*m*MS_PA) contribuiu com 18,95 Mg ha^{-1}, enquanto o estoque de carbono na massa de matéria seca de raízes (C-*m*MS_R) representou 1,15 Mg ha^{-1}.

Figura 21. Balanço de carbono (BC, Mg ha^{-1}) no sistema em função da dose de máxima eficiência econômica (DMEE = 21,7 g kg^{-1}). As entradas abrangeram: (i) o estoque de carbono orgânico total (C - COT, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e MOAM, mensurado nas profundidades de 0–40, 40–70 e 70–100 cm no terceiro ano de experimento; (ii) o estoque de carbono na massa de matéria seca de raízes (C-*m*MS_R, Mg ha^{-1}) da braquiária, nas profundidades de 0–40 e 40–100 cm, também no terceiro ano; e (iii) o estoque de carbono acumulado na massa de matéria seca da

parte aérea (C-*m*MS_PA, Mg ha^{-1}) da braquiária durante os 840 dias de avaliação. As saídas de carbono incluíram: (i) o estoque de carbono lábil (C-CL, Mg ha^{-1}) nas frações MOP e MAM nas profundidades de 0–40, 40–70 e 70–100 cm no terceiro ano; (ii) a emissão acumulada (C-GEE, Mg ha^{-1}) dos gases de efeito estufa (CO_2, CH_4 e N_2O), convertida em carbono equivalente (C_{eq}), referente à aplicação da dose de 90 g kg^{-1} de cama de aviário; e (iii) o carbono perdido por lixiviação (C-LIX, Mg ha^{-1}).



As saídas de carbono somaram 27,96 Mg ha⁻¹, sendo o carbono lábil (C-CL) responsável por 17,97 Mg ha⁻¹, representando aproximadamente 64% das perdas totais. As emissões de gases de efeito estufa (C-GEE) convertidas em carbono equivalente corresponderam a 9,91 Mg ha⁻¹ enquanto as perdas por lixiviação de carbono (C-LIX) foram muito inferiores as demais, representando apenas 0,06 Mg ha⁻¹.

7. DISCUSSÃO

7.1. Dinâmica do carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica do solo

A MOAM é amplamente reconhecida como a principal fração da MOS, alguns autores relatam que cerca de 80% e 91% do carbono em solos tropicais e subtropicais está associado a ela (Bettiol et al., 2023), que. Essa predominância decorre da maior

estabilidade da MOAM, associada às frações finas do solo (silte e argila), que conferem proteção química contra a decomposição microbiana. A textura da torta de argila favorece essa estabilização ao oferecer superfícies reativas para a formação de associações organominerais, tornando a MOAM um reservatório com capacidade de se acumular ao longo do tempo decorrido desde a construção do solo. Em contrapartida, a MOP é mais dinâmica e suscetível à decomposição, com menor tempo de permanência no solo, embora continue desempenhando papel fundamental na ciclagem de nutrientes e na sustentação da atividade microbiana inicial (LIANG et al., 2017; LAVALLEE; COTRUFO et al., 2019). Essa dualidade funcional entre as frações evidencia a complementaridade de seus papéis no sistema.

A influência da cama de aviário nos estoques de COT foi mais pronunciada nas camadas subsuperficiais, onde o resíduo foi diretamente incorporado, para ambas as frações. A elevação inicial do carbono orgânico total na fração MOP reflete a incorporação do resíduo orgânico na matriz do solo, composto por materiais orgânicos fragmentados e parcialmente decompostos, característicos desta fração (LAVALLEE et al., 2019). Em contraste, os efeitos na fração MOAM foram menos acentuados e mais graduais ao longo do tempo, refletindo seu processo de formação mais lento, que depende da decomposição microbiana do material orgânico e de sua posterior estabilização (LIANG et al., 2017; LAVALLEE et al., 2019).

Na camada superficial, que não recebeu aplicação direta de cama de aviário, os estoques de carbono nas frações MOP e MOAM permaneceram estáveis, contrastando com a dinâmica observada nas camadas mais profundas. O aumento temporal do estoque de carbono na fração MOAM dessa camada pode indicar uma translocação gradual de carbono da MOP para a MOAM, a partir da MOS original presente no *topsoil*, favorecido pelos aportes orgânicos da biomassa de parte aérea e raiz da braquiária e de suas rizodeposições, especialmente considerando que grande volume do sistema radicular se concentrou nessa camada (POIRIER et al., 2018; PANCHAL et al., 2022). Esse padrão evidencia a importância da cobertura vegetal no processo de ciclagem e estabilização do carbono.

O grau de saturação de carbono da MOAM permaneceu abaixo da metade do seu potencial teórico, mesmo para os tratamentos com grande porcentagem de resíduo orgânico adicionado, indicando que os tecno-solos construídos com torta de argila e cama de aviário ainda apresentam grande capacidade de acúmulo adicional de carbono. Condição semelhante de subsaturação foi relatada por Georgiou et al.

(2022), que identificaram médias de saturação de carbono em torno de 46 ± 3% em solos sob pastagens e florestas, e apenas 31 ± 2% em sistemas agrícolas. O estudo destaca que solos degradados, por apresentarem maior déficit de saturação, possuem elevado potencial para atuarem como sumidouros de carbono, uma vez que esse déficit amplia sua eficiência de acumular carbono adicional. Esse resultado tem implicações importantes para estratégias de mitigação das mudanças climáticas, sugerindo que a recuperação de áreas mineradas através da construção de tecno-solos pode contribuir significativamente para o sequestro de carbono atmosférico.

Porém, com o tempo, particularmente nos anos 2 e 3, foi observado que o estoque de carbono na fração MOAM das doses mais elevadas de cama de aviário apresentou tendência à estabilização e, em alguns casos, à redução. Este comportamento está associado ao efeito *priming*, modulado pela composição do substrato e pela biomassa microbiana (KUZYAKOV, 2010; LAL, 2018). Inicialmente, com a braquiária em fase inicial de desenvolvimento, a cama de aviário representou a principal fonte de substrato para a microbiota. Devido à sua constituição bioquímica rica em nutrientes, esse material favoreceu a atividade e o crescimento da biomassa microbiana, acelerando a decomposição da matéria orgânica e promovendo o acúmulo de carbono. À medida que a cama de aviário foi decomposta, sua massa como principal fonte de substrato diminuiu, sendo progressivamente substituída pela biomassa radicular da braquiária que se desenvolveu. No entanto, esse novo substrato era mais recalcitrante, com alta relação C:N e elevada composição de compostos lignificados, o que reduziu a eficiência de formação da MOS, desencadeando um efeito *priming* responsável pela estabilização e até redução dos estoques de carbono.

A aplicação de doses crescentes de cama de aviário também resultou em aumentos progressivos nos estoques de nitrogênio total no solo, com a fração MOAM se destacando como o principal compartimento de acúmulo. Na camada superficial, os estoques de nitrogênio total na fração MOAM aumentaram gradualmente ao longo dos anos, enquanto nas camadas subsuperficiais, os maiores teores foram observados logo após a aplicação da CA. Essa diferença temporal na resposta entre as camadas reflete os distintos mecanismos de aporte do nitrogênio ao solo: nas camadas subsuperficiais, a aplicação direta proporcionou disponibilidade imediata, enquanto na camada superficial, o acúmulo gradual resultou da ciclagem contínua por meio da biomassa vegetal (PITTA et al., 2012).

Há uma forte interdependência entre os teores de carbono e nitrogênio na formação e estabilização da matéria orgânica do solo, sendo necessário uma determinada quantidade de nitrogênio para cada incremento unitário de carbono (KIRKBY et al., 2013). Pois, como componente essencial de enzimas, proteínas e ácidos nucleicos microbianos, o nitrogênio determina a capacidade da microbiota em decompor resíduos orgânicos. Assim, a relação C:N dos materiais influencia diretamente a estabilização da matéria orgânica, e sua redução, pela maior disponibilidade de nitrogênio, favorece o acúmulo de carbono no solo (SALTON et al., 2011; COTRUFO; LAVALLEE, 2022). Portanto, o consórcio de *Urochloa decumbens* com leguminosas ou a adubação nitrogenada suplementar pode representar uma alternativa para atenuar o efeito *priming* e favorecer novamente o acúmulo e a estabilização do carbono no tecno-solo.

7.2. Resposta produtiva da *Urochloa decumbens* e distribuição da biomassa

A resposta da produtividade da *Urochloa decumbens* às doses crescentes de cama de aviário está alinhada com diversos estudos que demonstram aumentos pronunciados na produtividade de gramíneas tropicais fertilizadas com esse resíduo orgânico (LIMA et al., 2011; SILVA, 2019; COSTA, 2020; MELO et al., 2021). Isso ocorre porque a cama de aviário é fonte eficiente de fornecimento de macro e micronutrientes, fundamentais para o desenvolvimento vegetal (SILVA et al., 2011; PITTA et al., 2012; MIELE & MILAN, 2014; MARUTHAMUTHU et al., 2024). A resposta produtiva progressiva ao longo dos três anos de avaliação evidencia o efeito residual da cama de aviário, característica que a distingue dos fertilizantes minerais convencionais (NETO et al., 2018; COSTA, 2020). Esse efeito resulta do processo de decomposição contínuo do material orgânico, com consequente mineralização gradual de nutrientes ao longo do tempo, favorecendo múltiplos cortes da forrageira com uma única aplicação (PITTA et al., 2012; SHAH et al., 2017; MARZI et al., 2020).

A determinação da dose de máxima eficiência econômica baseia-se na Lei dos Rendimentos Decrescentes, estabelecendo que aumentos sucessivos na aplicação de um insumo resultam em incrementos cada vez menores na produtividade (RAIJ, 1991; NOVAIS et al., 2007). Assim, a estabilidade da produção de matéria seca de parte aérea da braquiária nas doses mais elevadas de cama de aviário pode ser

explicada por dois fatores principais. Primeiro, o crescimento das gramíneas segue um padrão sigmoide, caracterizado por três fases: lenta inicial, rápida exponencial e estabilização (BROWN, 1984; HABERMANN et al., 2019; HABERMANN et al., 2022). Segundo, mesmo que as limitações nutricionais sejam superadas, outros fatores ambientais como luz, água ou concentração de CO_2 passam a limitar o crescimento vegetal.

Ainda, a distribuição da biomassa radicular da *Urochloa decumbens* apresentou alterações significativas ao longo do tempo, refletindo a adaptação da planta às condições do tecno-solo. No segundo ano, a distribuição vertical homogênea da massa de matéria seca de raiz ao longo do perfil do solo sugere uma fase inicial de colonização radicular, típica de pastagens recém-implantadas, nas quais as plantas direcionam o crescimento para o sistema radicular a fim de maximizar a captação de água e nutrientes (CASTRO et al., 2023). No terceiro ano, houve mudança expressiva na distribuição da biomassa radicular com aumento na massa de matéria seca de raiz na camada superficial e redução nas camadas 40-70 cm e 70-100 cm, respectivamente, indicando concentração do sistema radicular no *topsoil*. Essa reorganização da arquitetura radicular está relacionada às propriedades físicas do tecno-solo e à disponibilidade de recursos ao longo do perfil.

Esperava-se que o aumento do teor de MOS promovesse melhorias nas propriedades físicas do solo, uma vez que a torta de argila apresenta textura silto-argilosa, alta dispersão e tende a formar um solo com elevada densidade. Adicionalmente a MOS, gramíneas do gênero *Urochloa* favorecem a estruturação do solo por meio de seu sistema radicular vigoroso, promovendo a formação de bioporos funcionais, o enlace e contenção física das partículas do solo e a estabilidade de agregados (BAPTISTELLA et al., 2020; HUSSAIN et al., 2023). No entanto, mesmo após três anos, a densidade das camadas mais profundas (40-100 cm) permaneceu elevada, em torno de 1,58 g cm^{-3}, limitando a penetração e o desenvolvimento do sistema radicular nessa profundidade. Esse resultado está de acordo com os achados de Stumpf et al. (2014), que identificaram condições físicas inadequadas em solos construídos após mineração mesmo após 78 meses de condução do experimento, evidenciando que a recuperação das propriedades físicas em tecno-solos é um processo de longo prazo que pode requerer décadas para se aproximar das condições de solos naturais.

Dessa forma, o acúmulo de raízes na camada de 0-40 cm pode ser atribuído tanto à qualidade do *topsoil*, rico em MOS e com menor densidade (~1,24 g cm^{-3}), quanto às restrições físicas nas camadas inferiores. A análise da relação entre a massa de matéria seca de raiz e de parte aérea reforça essa interpretação. No segundo ano, essa relação foi constante entre todas as doses de cama de aviário, sugerindo padrão equilibrado de alocação de biomassa, com maior investimento proporcional no sistema radicular. No terceiro ano, essa relação diminuiu com o aumento das doses de CA, evidenciando maior alocação de biomassa na parte aérea em detrimento das raízes, coerente com a maior disponibilidade de nutrientes promovida pelo efeito residual das doses de CA. Essa mudança no padrão de alocação de biomassa reflete uma estratégia adaptativa da planta, que prioriza o crescimento radicular quando há limitações nutricionais e desloca o investimento para a parte aérea quando os recursos se tornam mais abundantes.

O aumento das doses de cama de aviário impactou de forma distinta os teores de carbono e nitrogênio no tecido vegetal da braquiária. Enquanto os teores de carbono se mantiveram relativamente estáveis, os teores de nitrogênio na parte aérea e, principalmente, nas raízes, foram mais responsivos à aplicação de cama de aviário. Essa diferença na resposta se explica pelas vias distintas de incorporação desses elementos na biomassa vegetal. O carbono é o principal componente estrutural da biomassa vegetal fixado pela fotossíntese, enquanto o nitrogênio é um nutriente absorvido, e sua disponibilidade no solo reflete-se diretamente em sua concentração no tecido vegetal (KIBA; KRAPP, 2016; TANG et al., 2018; NING et al., 2022). A maior disponibilidade de nitrogênio favorece o crescimento vegetal, promovendo maior acúmulo de carbono incorporado da atmosfera e de nitrogênio na biomassa. A proporção entre esses nutrientes nos tecidos vegetais define a relação C/N e esta, a dinâmica da MOS, como discutido anteriormente.

7.3. Emissões de gases de efeito estufa e implicações ambientais

A distribuição vertical das concentrações de GEEs apresentou forte dependência da dose de cama de aviário, refletindo a intensidade dos processos biogeoquímicos no solo. A mineralização do carbono proveniente da incorporação de CA, associada à presença de raízes vivas, exsudatos e resíduos senescentes da

braquiária, fornece substrato para os microrganismos do solo, estimulando sua atividade e intensificando a emissão de gases associados aos processos de decomposição (THANGARAJAN et al., 2013; HAIDER et al., 2025). O CO_2 foi o principal contribuinte para o carbono equivalente total emitido, resultante da respiração do solo proveniente da atividade biológica das raízes de braquiária (componente autotrófico) e microrganismos em condições aeróbicas (componente heterotrófico) (GAYAN et al., 2023).

A emissão de CO_2 pelo solo é sensível a alterações nas suas propriedades físicas, condições ambientais e na qualidade do resíduo orgânico aplicado. No presente estudo, apesar das condições de baixa porosidade, temperaturas atenuadas pela cobertura vegetal e elevada relação C:N da gramínea, fatores que tenderiam a reduzir a emissão de CO_2, o principal fator controlador foi a elevada dose de cama de aviário aplicada, que estimulou intensamente a atividade microbiana pelo aporte conjunto de nitrogênio, nutriente essencial ao metabolismo microbiano, como já discutido anteriormente.

O N_2O apresentou a menor participação relativa entre os gases de efeito estufa emitidos, sendo gerado por processos microbianos como subproduto da nitrificação, em condições aeróbicas, e como produto da desnitrificação, em ambientes anaeróbicos (WRAGE et al., 2001). A *Urochloa decumbens* possui a capacidade de exsudar compostos inibidores da nitrificação pelas raízes, em resposta à presença de NH_4^+ na rizosfera, sendo uma estratégia promissora para mitigar essas emissões (SUBBARAO et al., 2007; BAPTISTELLA et al., 2020). Essa característica funcional da braquiária representa uma vantagem adicional para sua utilização em sistemas de recuperação de áreas degradadas, contribuindo não apenas para a revegetação e estabilização do solo, mas também para a redução de emissões de GEEs.

No caso do CH_4, não se observou resposta às doses de cama de aviário e prevaleceu o influxo, comportamento possivelmente associado à predominância da metanotrofia, processo que ocorre em condições aeróbicas nas quais o CH_4 é oxidado a CO_2 fazendo com que o solo atue como dreno de CH_4.

Em síntese, a aplicação de cama de aviário no tecno-solo eleva as emissões de CO_2 e N_2O, sendo a magnitude dos fluxos dependente da aplicação de resíduo orgânico, da atividade da microbiota decompositora, da atividade radicular da braquiária e das condições impostas pelas propriedades físicas do solo construído. Esses resultados evidenciam a importância de ponderar os benefícios agronômicos e

ambientais decorrentes da aplicação de resíduos orgânicos frente às emissões de GEEs do sistema, visando estabelecer práticas mais eficazes para a construção de tecno-solos como base para uma agricultura de baixo carbono.

7.4. Perdas de nutrientes por lixiviação e qualidade da água

A tendência de aumento proporcional das perdas por lixiviação em resposta às doses crescentes de cama de aviário reflete a elevada mobilidade dos nutrientes liberados pela decomposição da matéria orgânica. Assim, considerando a mineralização dos nutrientes em materiais orgânicos como uma reação cinética de primeira ordem, quanto maior a dose do material aplicado, maior a quantidade de nutrientes passíveis de mineralização e percolação pela água de infiltração (MANZONI & PORPORATO, 2009).

Além disso, o aumento significativo do volume de lixiviado com o incremento das doses de cama de aviário evidencia a influência da MOS sobre as propriedades hídricas, uma vez que tem a capacidade de reter até vinte vezes sua massa em água, favorecendo o armazenamento hídrico e a subsequente percolação (BRADY & WEILL, 2008; STEVENSON, 1994).

As formas de carbono lixiviadas são constituídas pela matéria orgânica dissolvida (MOD), que é considerada a fração mais móvel e reativa de carbono no solo, e é definida como moléculas orgânicas de diferentes massas moleculares que passam por filtros com porosidade de 0,45 μm (McGILL et al., 1986; ZSOLNAY, 2003; BETTIOL et al., 2023). Além de atuar ativamente no transporte e fluxo de nutrientes até as raízes, a MOD, na forma aniônica, polar e dissociada, pode interagir com minerais do solo e ser adsorvida, contribuindo para o “pool” de carbono no solo, reforçando seu papel como sumidouro de C (KALBITZ et al., 2000; GMAICH et al., 2020; BETTIOL et al., 2023).

Durante a decomposição da cama de aviário, há liberação progressiva desses compostos solúveis por meio de processos de mineralização. Adicionalmente, a MOD também pode ser proveniente da exsudação radicular, do material vegetal acima do solo e da chuva (GMAICH et al., 2020). O padrão temporal de lixiviação do carbono na dose de 160 g kg^{-1} de cama de aviário indica que, inicialmente, pela quantidade elevada de CA adicionado ao solo, maior quantidade das formas solúveis foram

percoladas ao longo do perfil. Porém, ao longo do tempo, parte da MOD passa a ser sequestrada no perfil do solo por meio da formação de associações organo-minerais estáveis com partículas de argila, processo que reduz gradativamente as perdas por lixiviação nas coletas subsequentes (SAIDY et al., 2015).

O nitrogênio apresentou comportamento mais variável, com um pico observado em novembro de 2024, sugerindo ciclos de mineralização e imobilização da matéria orgânica do solo proveniente da cama de aviário e da braquiária em termos de compartimentos vegetais e exsudados, influenciados pelas condições ambientais e pela atividade microbiana. A decomposição microbiana dos compostos nitrogenados orgânicos libera, inicialmente, amônio, que é posteriormente nitrificado a nitrato em condições aeróbias (STROCK, 2008).

A maior suscetibilidade do nitrato à lixiviação está relacionada a suas propriedades químicas. Por ser um ânion, o nitrato apresenta alta mobilidade devido à sua repulsão pelas cargas negativas das partículas do solo. Em contraste, o amônio, sendo um cátion, é retido nos sítios de troca catiônica, o que reduz sua mobilidade (NOVAIS; SMYTH, 1999). A nitrificação progressiva do amônio a nitrato, impulsionada pela atividade microbiana, intensifica a vulnerabilidade às perdas por lixiviação ao longo do tempo, porém, a braquiária é uma boa aliada para mitigar esse resultado, visto sua eficiência na utilização desse nutriente (STROCK, 2008; KARWAT et al., 2017).

As perdas de fósforo por lixiviação foram de menor magnitude em comparação às formas de nitrogênio, devido aos mecanismos específicos de retenção do fósforo no solo. O fósforo forma complexos estáveis com óxidos de ferro e alumínio, precipita com cálcio em ambientes alcalinos e é adsorvido por ligações específicas nas superfícies das argilas, o que limita sua mobilidade no perfil (NOVAIS; SMYTH, 1999). No entanto, a aplicação de cama de aviário e sua produção de ácidos orgânicos que competem pelos sítios de adsorção, pode reduzir a capacidade do solo de atuar como dreno de P, aumentando o potencial de lixiviação desse nutriente, especialmente quando não é eficientemente absorvido pela forrageira em profundidade (NOVAIS; SMYTH, 1999; PAVINATO; ROSOLEM et al., 2008).

Os impactos ambientais decorrentes de concentrações de nutrientes acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 são relevantes para a qualidade dos recursos hídricos. Altos teores de nitrato e fósforo podem desencadear a eutrofização de corpos d’água, promovendo o florescimento de algas, a redução do

oxigênio dissolvido, a morte de organismos aquáticos e a degradação da qualidade da água (SHARPLEY, 1999; KHAN; MOHAMMAD, 2014). Dessa forma, como também discutido por Rosado (2023), a definição da dose ideal de cama de aviário para a construção de Tecnossolos deve considerar não apenas os benefícios agronômicos, mas também os riscos potenciais de contaminação hídrica. O monitoramento contínuo da qualidade da água de drenagem é essencial para maximizar os benefícios da cama de aviário e, simultaneamente, mitigar impactos ambientais adversos.

7.5. Balanço de carbono e perspectivas para tecno-solos

A recuperação de áreas degradadas pela mineração constitui um desafio ambiental de escala global. Nesse contexto, a construção de tecno-solos enriquecidos com resíduos orgânicos surge como uma estratégia promissora, capaz não apenas de restabelecer a funcionalidade ecológica de ecossistemas comprometidos, mas também de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono (BATJES, 2014; GEORGIOU et al., 2022; RUIZ, 2023).

O balanço de carbono no solo, determinado pela diferença entre as entradas e as saídas de carbono no sistema, é um indicador fundamental da capacidade de um solo atuar como sumidouro de carbono (LAL, 2018; SÁ et al., 2019). Quando as entradas superam as perdas, observa-se um balanço positivo, refletindo a eficiência do sistema em reter carbono no perfil do solo.

A análise detalhada dos componentes desse balanço evidencia a complexidade dos processos que regulam o sequestro de carbono. As principais entradas foram impulsionadas pela adição de matéria orgânica proveniente da cama de aviário e pela produção de biomassa de *Urochloa decumbens*, que contribui de forma contínua com carbono derivado da fixação fotossintética. Nessas condições, o carbono total (C-COT) representou a maior fração das entradas, demonstrando a eficiência da adição de resíduos orgânicos na construção dos tecno-solos e o papel da revegetação na manutenção do aporte de carbono.

Por outro lado, as perdas de carbono, embora quantitativamente menores, são determinantes para a avaliação da eficiência do sequestro. A principal via de saída ocorreu na forma de carbono da fração leve (C-CL), o que ressalta a importância de

estratégias que promovam sua estabilização física por meio da formação de agregados, especialmente considerando que a maior parte desse carbono está associada à fração particulada. As perdas por emissão de gases de efeito estufa (C-GEE) e por lixiviação (C-LIX) mostraram-se menos expressivas, mas ainda assim exigem monitoramento contínuo para otimizar o balanço de carbono e maximizar o potencial mitigador dos tecno-solos.

Os resultados deste estudo corroboram essas observações, evidenciando um saldo positivo de carbono no sistema, com acúmulo de 179,08 Mg ha^{-1} em três anos de monitoramento. Esses dados demonstram o potencial dos tecno-solos para acumular carbono de forma progressiva e sustentável.

Embora os tecno-solos ainda não sejam formalmente reconhecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e a maior parte dos estudos existentes tenha sido conduzida em regiões de clima temperado (RUIZ et al., 2020), pesquisas nacionais vêm avançando e confirmando seu potencial, sobretudo quando enriquecidos com fontes orgânicas e revegetados (STUMPF et al., 2014; SILVA, 2023; ROSADO, 2023; RUIZ, 2023).

O presente estudo reforça essa perspectiva ao demonstrar que a aplicação de cama de aviário associada ao cultivo de *Urochloa decumbens* favorece o aumento dos estoques de carbono, especialmente na fração mais estável da matéria orgânica do solo (MOAM), contribuindo para a remoção de CO_2 da atmosfera e sua incorporação ao solo. Assim, o sequestro de carbono em tecno-solos consolida-se como uma estratégia-chave tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para a recuperação de áreas degradadas pela mineração.

Para o avanço desse campo, é essencial que futuras pesquisas aprofundem a otimização das formulações de tecno-solos, investiguem aspectos geotécnicos relacionados à estabilidade dos perfis construídos, explorem o uso de uma maior variedade de resíduos e avaliem sua viabilidade em larga escala, com monitoramento de longo prazo. O fortalecimento desse conhecimento é fundamental para consolidar os tecno-solos como uma ferramenta efetiva de restauração ambiental e mitigação climática em ambientes tropicais.

8. CONCLUSÕES

A dose de máxima eficiência econômica para a produção de massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa decumbens* cultivada em tecno-solo foi de 21,7 g kg^{-1} de cama de aviário.

Doses de cama de aviário que resultam na lixiviação de nutrientes em concentrações acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 devem ser consideradas como critério na escolha da dose a ser misturada à torta de argila na construção de tecno-solos.

O balanço de carbono do sistema na DMEE foi positivo, com acúmulo de 179,08 Mg ha^{-1} ao longo de três anos de monitoramento.

O tecno-solo construído com subproduto da concentração da bauxita (torta de argila) e acrescido de cama de aviário demonstrou elevado potencial como sumidouro de carbono, contribuindo para estratégias de mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABAL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade. São Paulo. Abril/2017.

AMARAL, L. A. Estratégia de utilização de topsoil na restauração ambiental. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

BAPTISTELLA, J. L. C.; ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J.L.; MAZZAFERA, P. Urochloa em Agroecossistemas Tropicais. Fronteiras em Sistemas Alimentares Sustentáveis (2020).

BATJES, N. H. "Carbono e nitrogênio totais nos solos do mundo." Revista europeia de ciência do solo 65.1 (2014): 10-21.

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. 1a edição. Publicação digital (2023): PDF. Brasília, DF : Embrapa, 2023. p. 627-644.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. The nature and properties of soils. 14 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. p. 965.

BRASIL. Decreto no 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2°, inciso VIII, da Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. Diário [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 12 abr. 1989.

BROWN, R.H. Growth of the green plant. In: TESAR, M.B. Physiological basis of crop growth and development. Madison: ASA, CSSA, 1984. p. 153-174

CARNEIRO, M.A.C.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; SOARES, A.L.L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:621-632, 2008.

CARVALHO, A.M.X.; MENDES, F.Q.; MENDES, F.Q.; TAVARES, L.F. SPEED Stat: a free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 20(3): e327420312, 2020. http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46

CASTRO FILHO, C. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.22, n.3, p.527-538, 1998.

CASTRO, P. R. de C.; KLUGE, R.A.; CARVALHO, M. E. A.; SILVA, M.S.; FAVA, R.D.; NICOLAI, A.B.; SALIB, N.C. Braquiárias: ecofisiologia. Nº 80 (Série Produtor Rural). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2023.

DOI: https://doi.org/10.11606/9786587391434 Disponívelem: www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/1147 .

CORREA, J. C., e M. MIELE. A cama de aves e os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos. 2011. In: PALHARES, J. C. P.; KUNZ, A. (Ed.). Manejo ambiental na avicultura, 2011. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. p. 125-152. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 149).

COSTA, D. C. Efeitos residuais da fertilização orgânica e mineral aplicada na recuperação de solo de pastagem minerado para bauxita. 2020. 39 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. Nature Geoscience, v. 12, p. 989-994, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6.

DING, K.; LUO, J.; CLOUGH, T. J.; LEDGARD, S.; LINDSEY, S.; DI, H. O tipo de solo afeta a partição da urina-15N de ruminantes devido à variação no potencial de nitrificação, imobilização e drenagem em condições de outono-inverno, Biologia e Bioquímica do Solo, 10.1016 / j.soilbio.2025.109782, 205, (109782), (2025).SUBBARAO et al., 2007

DYNARSKI, K. A.; BOSSIO, D. A.; SCOW, K. M. “Estabilidade Dinâmica do Carbono do Solo: Reavaliando a “Permanência” do Sequestro de Carbono do Solo”. Frontiers in Environmental Science (2020).

GAYAN, A.; BORAH, P.; NATH, D.; KATAKI, R. Chapter 4 - Soil microbial diversity, soil health and agricultural sustainability, Editor(s): Muhammad Farooq, Nirmali Gogoi, Michele Pisante, Sustainable Agriculture and the Environment, Academic Press, 2023, Pages 107-126, ISBN 9780323905008, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00006-3.

GEORGIOU, K.; JACKSON, RB, VINDUŠKOVÁ, O. et al. Estoques globais e capacidade de carbono orgânico do solo associado a minerais. Nat Commun 13, 3797 (2022). https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9

GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; KAISER, K.; CERRI, C. E. P. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review. Science Agricola, v. 77, e20180164, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0164.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V. de; ASSIS, R.L. de; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. Engenharia Agrícola, v.26, p.67-75, 2006. DOI: 10.1590/S0100-69162006000100008.

HABERMANN E.; DIAS DE OLIVEIRA E. A.; CONTIN D.R.; COSTA J. V. C. P.; COSTA K. A. P.; MARTINEZ C. A. Warming offsets the benefits of elevated CO2 in water relations while amplifies elevated CO2-induced reduction in forage nutritional value in the C4 grass Megathyrsus maximus. Front Plant Sci. 2022 Dec 5;13:1033953.

doi: 10.3389/fpls.2022.1033953. PMID: 36544868; PMCID: PMC9760913.HUSSAIN et al., 2023

HABERMANN, E.; DIAS DE OLIVEIRA, E. A,; CONTIN, D. R.; DELVECCHIO, G.; VICIEDO, D. O.; de MORAES, M. A.; de MELLO PRADO, R.; de PINHO COSTA, K. A.; BRAGA, M. R.; MARTINEZ, C. A (2019), O aquecimento e o déficit hídrico impactam a fotossíntese foliar e diminuem a qualidade da forragem e a digestibilidade de uma gramínea tropical C4. Physiol Plantarum, 165: 383 402. https://doi.org/10.1111/ppl.12891

HAIDER, S.; SONG, J.; BAI, J.; WANG, X., REN, G.; BAI, Y.; HUANG, Y.; SHAH, T.; FENG, F. Rumo a uma Agricultura de Baixa Emissão: Contribuição Sinérgica do Nitrogênio Inorgânico e Fertilizantes Orgânicos para as Emissões de GEE e Estratégias de Mitigação. Plants 14 (2025)

IBRAM. Infográfico Mineração em Números – Primeiro Semestre de 2024. Portal da Mineração. 2024.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2024). “Normais Climatológicas do Brasil (2022-2024). Acesso em 14/10/2024.

IUSS Working Group WRB (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106, Rome: FAO.

JANGORZO, N.S.; WATTEAU, F.; SCHWARTZ, C. Evolução da estrutura de poros de Technosols construídos durante a pedogênese inicial quantificada por análise de imagem. Gee, GW, Ou, D., 2002. Análise de tamanho de partícula. em Mehtods of Soil Analysis, Parte 4: Physical Mehtods. Ambiente. Geoderma 207–208, 2013. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.016

KALBITZ, K.; SOLINGER, S.; PARK, J.H.; MICHALZIK, B.; MARTZNER, E. Controls on the dynamics of organic matter in soils: a review. Soil Science, v. 165, p. 277-304, 2000.

KARWAT, H.; MORETA, D.; ARANGO, J.; NÚÑEZ, J.; RAO, I.; RiNCÓN, Á. Efeito residual do BNI em pastagem de Brachiaria humidicola na recuperação de nitrogênio e no rendimento de grãos do milho subsequente. Plant Soil 420, 389–406, 2017. DOI: 10.1007/s11104-017-3381-z

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T. F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. Advances in poultry litter disposal technology – a review, Bioresource Technology, Volume 83, Issue 1, 2002, Pages 27-36, ISSN 0960-8524, https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X.

KHAN, M.; MOHAMMAD, F. (2014). Eutrofização: Desafios e Soluções. Em: Ansari, A., Gill, S. (orgs.) Eutrofização: Causas, Consequências e Controle. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7814-6_1

KIRKBY, C. A., RICHARDSON, A. E.; WADE, L. J.; BATTEN, G. D.; Blanchard, C.; KIRKEGAARD, J. A. Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. Soil Biology and Biochemistry, 60, 77-86, 2013.

LAVALLEE J. M.; SOONG J. L.; COTRUFO M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. Glob Chang Biol. 2020 Jan;26(1):261-273. doi: 10.1111/gcb.14859. Epub 2019 Nov 2. PMID: 31587451

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. European Journal of Soil Biology, v. 37, p.25-50, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6.

LIANG, C.; SCHIMEL, J. P.; JASTROW, J. D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. Nature microbiology 2, no. 8 (2017): 1-6.

LIANG, X. Pesquisa sobre a Influência da Lei dos Retornos Marginais Decrescentes na Agricultura. Avanços em Economia, Gestão e Ciências Políticas (2023)

LIMA, J. J., MATA, J. V. D., PINHEIRO NETO, R., & SCAPIM, C. A. (2011). Influência da adubação orgânica nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico e na produção de matéria seca de Brachiaria brizantha cv. Marandu. Acta Scientiarum Agronony , 29, 715 – 719

LUO, Y.; ZHOU, X. CHAPTER 2 - Importance and Roles of Soil Respiration, Editor(s): Yiqi Luo, Xuhui Zhou, Soil Respiration and the Environment, Academic Press, 2006, Pages 17-32, ISBN 9780120887828, https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50002-4.WRAGE et al., 2001

MANZONI, S.; PORPORATO, A. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales, Soil Biology and Biochemistry, Volume 41, Issue 7, 2009, Pages 1355-1379, ISSN 0038-0717, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.031.

MARTINS, WALMER & COSTA, BEATRIZ & JUNIOR, HELIO & SANTOS, MARIO & RODRIGUES, RICHARD & OLIVEIRA, F. (2019). Utilização do topsoil para restauração florestal de áreas degradadas pela mineração de bauxita: fatores a serem considerados. 10.22533/at.ed.1091915105.

MARTIRES, R. A.C. Alumínio. Balanço Mineral. DNPM, Brasília 2000/2008.

MARUTHAMUTHU, T.; KARUPPUSAMY, S.; VEERAMALAI, R.; NAGARAJAN, M.; MANIKA RAGAVAN, P.; SANTIAGO, M.; NALLATHAMBI, B.; DHARMALINGAM, A.P.S.; RADHAKRISHNAN, K.; RAMASAMY, A.; et al. Physicochemical Characterization of Broiler Poultry Litter from Commercial Broiler Poultry Operation in Semiarid Tropics of India. Agriculture 2024, 14, 1708. https://doi.org/10.3390/agriculture14101708

MARZI, M.; SHAHBAZi, K.; KHARAZI, N.; REZAEI, M. A Influência da Fonte de Aditivos Orgânicos na Mineralização de Carbono e Nitrogênio em Diferentes Solos. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 20 (2020): 177-191.

MCGILL, W. B.; CANNON, K. R.; ROBERTSON, J. A.; COOK, F. D. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations. Canadian Journal Soil Science, v. 66, p. 1-19, 1986. DOI: https://doi.org/10.4141/cjss86-001.

MELO, AF.; TEIXEIRA, MB.; SANTOS, EA dos.; JESUS, TF de.; CABRAL FILHO, FR.; CUNHA, FN.; VIDAL, VM.; SOARES, FAL.; TEIXEIRA FILHO, MCM.; ARAÚJO, LC de.; LAURENTIZ, AC de.; FERNANDES, P.B.; SILVA, EC da. Desempenho produtivo de cultivares de Brachiaria (sin. Urochloa) brizantha sob adubação orgânica. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento , [S. l.] , v. 7, pág. e10710716212, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16212.

MIELE, A.; MILAN, P. A. Composição mineral de cama de aviário de frangos de corte e sua utilização na adubação de vinhedos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, [S. l.], v. 18, n. 7, p. 729–733, 2014. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab1983.v18.15350. Disponível em: https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/15350.

NETO, P. M. L.; SENA JUNIOR, D. G.; DIAS, D. S.; CRUZ, S.C.S.; RESENDE, H. O.; COSTA, M. M. Cama de aves associada a adubação nitrogenada no cultivo do milho. Colóquio Agrariae 14 (2018): 39-50, (2018).

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.;CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do solo. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

ONU. Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2018. Disponível em <https://nacoesunidas.org/pos2015>. Acesso em 14/10/2024.

OVIEDO-RONDÓN, E. O. Tecnologias para mitigar o impacto ambiental da produção de frangos de corte. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 37, p. 239-252, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/rbz/v37nspe/a28v37nsp.pdf. Acesso em: 21 jul. 2019.

PANCHAL, P.; PREECE, C.; PEÑUELAS, J.; GIRI, J. Soil carbon sequestration by root exudates, Trends in Plant Science, Volume 27, Issue 8, 2022, Pages 749-757, ISSN 1360-1385, https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.04.009.

PARREIRAS, M. Com chuvas em Minas, pilha de rejeitos é o novo foco de preocupações. O Estado de Minas, 2022 b. https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/02/09/interna_gerais,1343499/com-chuvas-em-minas-pilha-de-rejeitos-e-o-novo-foco-de-preocupacoes.shtm

PARREIRAS, M. RISCO NA MINERAÇÃO: Erosões significativas fragilizam as maiores pilhas de rejeitos de MG. O Estado de Minas, 2022 a. (https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/04/01/interna_gerais,1357171/erosoessignificativas-fragilizam-as-maiores-pilhas-de-rejeitos-de-mg.shtml)

PARRON, L. M.; RACHWAL, M. F. G.; MAIA, C. D. F. Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.;

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: liberação e liberação de compostos orgânicos de resíduos orgânicos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32, 911-920, 2008. https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300001

PAZ, S. P. A. Desenvolvimento e otimização de métodos de controle de qualidade e de processo de beneficiamento para bauxitas gibbsíticas tipo-Paragominas. 2016. Universidade de São Paulo - USP, [s. l.], 2016.

PITTA, C. S. R., ADAMI, P. F., PELISSARI, A., ASSMANN, T. S., FRANCHIN, M. F., CASSOL, L. C., SARTOR, L. R. (2012). Year-round poultry litter decomposition and N, P, K and Ca release. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36 (1) 1043–1053

POIRIER, V.; ROUMET, C.; MUNSON, A. D. A raiz da questão: relacionando características das raízes e processos de estabilização da matéria orgânica do solo. Biologia e Bioquímica do Solo, 120 , 246-259, 2018.

RAIJ B. 1991. Fertilidade do solo e adubação. Campinas: Ceres. 343p.NOVAIS et al., 2007

REES, R.; DAGOIS, R.; DERRIEN, D.; FIORELLI, J.; WATTEAU, F.; MOREL, J. L.; SCHWARTZ, C.; SIMONNOT, M.; SÉRÉ, G. Storage of carbon in constructed technosols: in situ monitoring over a decade, Geoderma, Volume 337, 2019, Pages 641-648, ISSN 0016-7061, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.009.

ROSADO, H. T. Combinação de aglomerantes orgânicos com subproduto da concentração de bauxita na produção vegetal e na qualidade da água percolada em tecno-solos. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2023.

RUIZ F.; PERLATTI F.; OlIVEIRA D. P.; FERREIRA T. O. Revelando Tecnossóis Tropicais como Alternativa para Recuperação de Minas e Gestão de Resíduos. Minerais . 2020; 10(2):110. https://doi.org/10.3390/min10020110

RUIZ, F. Weathering and incipient pedogenesis of Technosols constructed from dolomitic limestone mine spoils. 2019. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. doi:10.11606/D.11.2019.tde-15052019-163221.

RUIZ, F. Carbon sequestration and mechanisms of soil organic matter stabilization in Technosols constructed for mine reclamation [doi:10.11606/T.11.2023.tde-13032024-150419]. Piracicaba : Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2023. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. [acesso 2025-07-30].

SÁ, J. C. M.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. B.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J.; OLIVEIRA FERREIRA, A.; BRIEDIS, C. Sistema plantio direto. In: In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOSA, G. M. de C.; SANTOS, J. B. dos; GUIMARÃES, M. de F. (ed.). Manual de manejo e conservação do solo e da água para o Estado do Paraná. Curitiba: SBCS, Nepar, 2019. p. 105-110

SAIDY, A. R.; SMERNIK, R. J.; BALDOCK, J.A.; KAISER, K.; SANDERMAN, J. 2015. Degradação microbiana de carbono orgânico sorvido em argilas filossilicatadas com e sem revestimento de óxido de ferro hidratado. European Journal of Soil Science 66: 83–94.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 46, p. 349-1356, 2011.

SÁNCHEZ, L.E. Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas. In: ALBA, J.M.F. (Ed.). Recuperação de áreas mineradas. 2.ed. rev. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p.103-121.

SHAH, S. A.; WISAL, M.; HAROON H.; KHAN, A. Efeito residual da aplicação de esterco de aves e nitrogênio mineral na produção de milho em sistema de cultivo de trigo e milho". Revista Turca de Agricultura: Ciência e Tecnologia de Alimentos 5 (2017): 1061-1065.

SHARPLEY, A. Agricultural phosphorus, water quality, and poultry production: are they compatible? Poultry Science, v. 78, p. 660-673, 1999. DOI: 10.1093/ps/78.5.660.

SHEORAN, 2010;

SILVA, A. A.; COSTA, A. M.; LANA, R. M. Q.; LANA, A. M. Q. Teores de micronutrientes em pastagem de Urochloa decumbens fertilizada com cama de frango e fontes minerais. Bioscience Journal, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 32-40, 2011.

SILVA, A.J,; CUNHA, F.F.; ROQUE, C.G.; RIBEIRO, D.O.; CARBALLAL, M.R.; SILVA, M.D.T.Recovery of degraded area of Urochloa decumbens with turkey litter fertilizer. Bioscience Journal, Uberlândia, MG, v. 35, n. 5, p. 1369–1377, 2019. DOI: 10.14393/BJ-v35n5a2019-39758.

SILVA, B. M. Tecnossolos construídos: uma "Nature Based Solution" para mitigação de mudanças climáticas. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-14092023-144002/. Acesso em: 30 jul. 2025.

STEVENSON, F. J. Humus chemistry: Genesis, composition and reactions. 2 ed, New York, John Wiley & Sons, 1994, 443p.RODRIGUES et al., 2021

STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F.; Six, J. Saturação de carbono do solo: conceito, evidência e avaliação. Biogeoquímica , 86 (1), 19-31, 2007.

STROCK, J. S. Ammonification, Editor(s): Sven Erik Jørgensen, Brian D. Fath, Encyclopedia of Ecology, Academic Press, Pages 162-165, ISBN 9780080454054, 2008. https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00256-1.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; GARCIA, G. F.; AMBUS, J. V.; SILVA, T. S.; PINTO, M. A. B.; TUCHTENHAGEN, I. K. (2016). Condição física e desenvolvimento radicular de gramíneas em solo construído após mineração de carvão. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 51(9), 1078–1087. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900007MULLER et al., 2001;

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; GARCIA, G. F.; AMBUS, J. V.; SILVA, T. S.; PINTO, M. A. B.; TUCHTENHAGEN, I. K. (2016). Condição física e

desenvolvimento radicular de gramíneas em solo construído após mineração de carvão. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 51(9), 1078–1087. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900007

SUBBARAO, G. V.; NAKAHARA, K.; HURTADO, M. P.; ONO, H.; MORETA, D. E.; SALCEDO, A. F. Evidências de inibição biológica da nitrificação em pastagens de Brachiaria. Processo. Nacional. Acad. Ciência. 106, 17302–17307, 2009. doi: 10.1073/pnas.0903694106

THANGARAJAN, R.; BOLAN, N. S.; TIAN, G.; NAIDU, R.; KUNHIKRISHNAN, A. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil, Science of The Total Environment, Volume 465, 2013, Pages 72-96, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.031.

VILAS BOAS, H. F.; ALMEIDA, L. F. J.; TEIXEIRA, R. S.; SOUZA, I. F.; SILVA, I. R. Soil organic carbon recovery and coffee bean yield following bauxite mining. Land Degradation and Development, v. 29, p. 1565-1573, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.2949

WMO. State of the climate in Latin America and the Caribbean 2024. Geneva: WMO, 2025. 53 p. (WMO-No. 1367). ISBN 978-92-63-11367-2. Disponível em: https://mcusercontent.com/618614864060486033e4590d6/files/6c1fe2b1-9005-2752-7627-8c01e1d5e058/LAC_2024_en_23.03.pdf.

YOUNG, R. E.; GANN, G. D.; WALDER, B.; LIU, J.; CUI, W.; NEWTON, V.; NELSON, C. R.; TASHE, N.; JASPER, D.; SILVEIRA, F. A. O.; CARRICK, P. J.; HÄGGLUND, T.; CARLSÉN, S.; DIXON, K. Princípios e padrões internacionais para a restauração e recuperação ecológica de áreas de mineração. Restor Ecol, 30: e13771, 2022. https://doi.org/10.1111/rec.13771

ZSOLNAY, Á. Dissolved organic matter: Artefacts, definitions, and functions. Geoderma, v. 113, p. 187-209, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00361-0.

ANEXO

Figura 22. Estoque de carbono orgânico total (*e*COT, Mg ha^{-1}) e proporção de carbono lábil (*e*CL, %) no estoque de COT na fração MOP da matéria orgânica do solo em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) para doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nos períodos avaliados: Tempo 0, ANO 1, ANO 2 e ANO 3. Os valores em porcentagem (%) para CL são apresentados acima das barras.

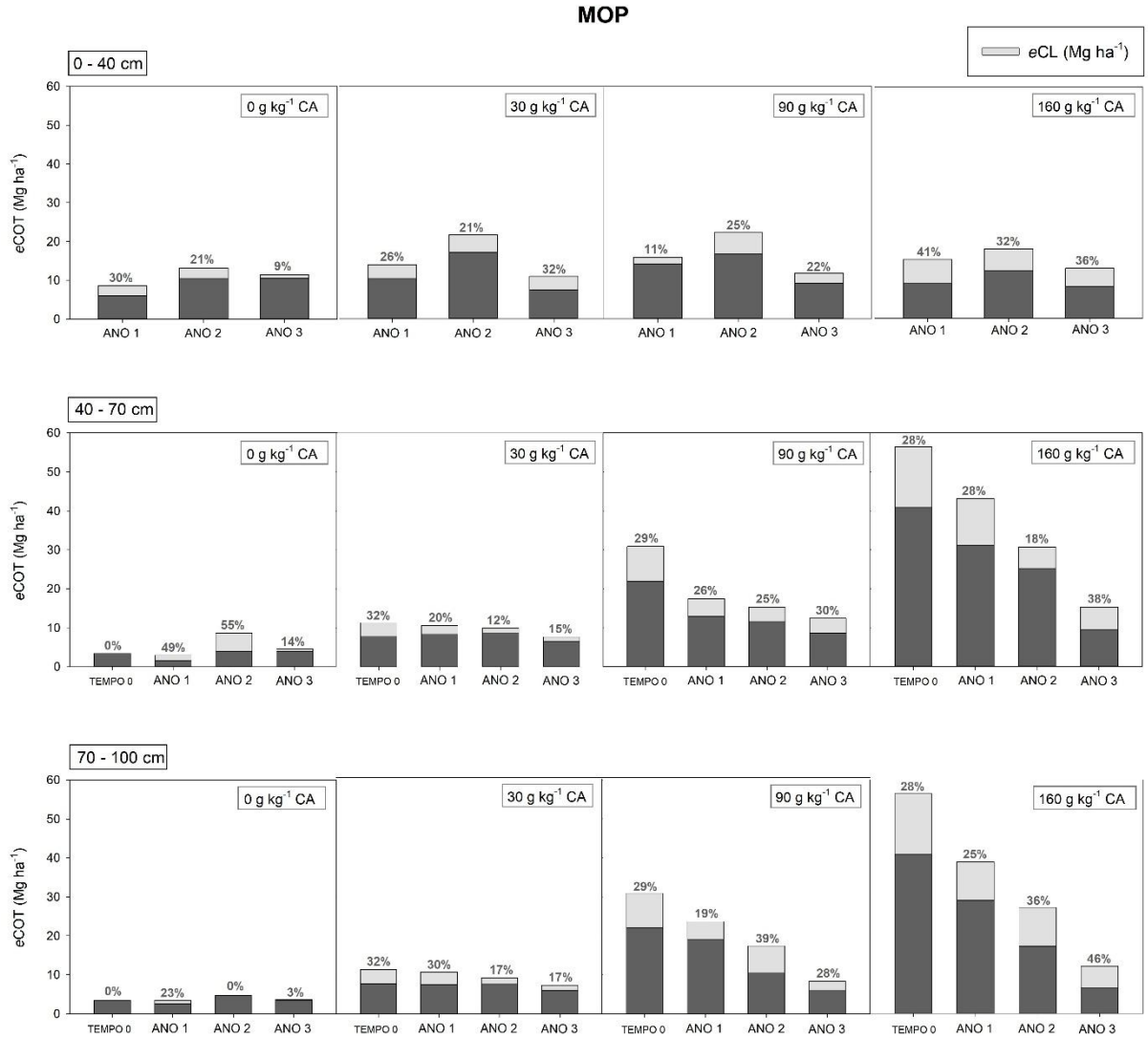


Figura 23. Estoque de carbono orgânico total (*e*COT, Mg ha^{-1}) e proporção de carbono lábil (*e*CL, %) no estoque de COT na fração MOAM da matéria orgânica do solo em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) em três profundidades (0-40, 40-70 e 70-100 cm) para doses crescentes de cama de aviário (0, 30, 90, 160 g kg^{-1}) nos períodos avaliados: Tempo 0, ANO 1, ANO 2 e ANO 3. Os valores em porcentagem (%) para CL são apresentados acima das barras.

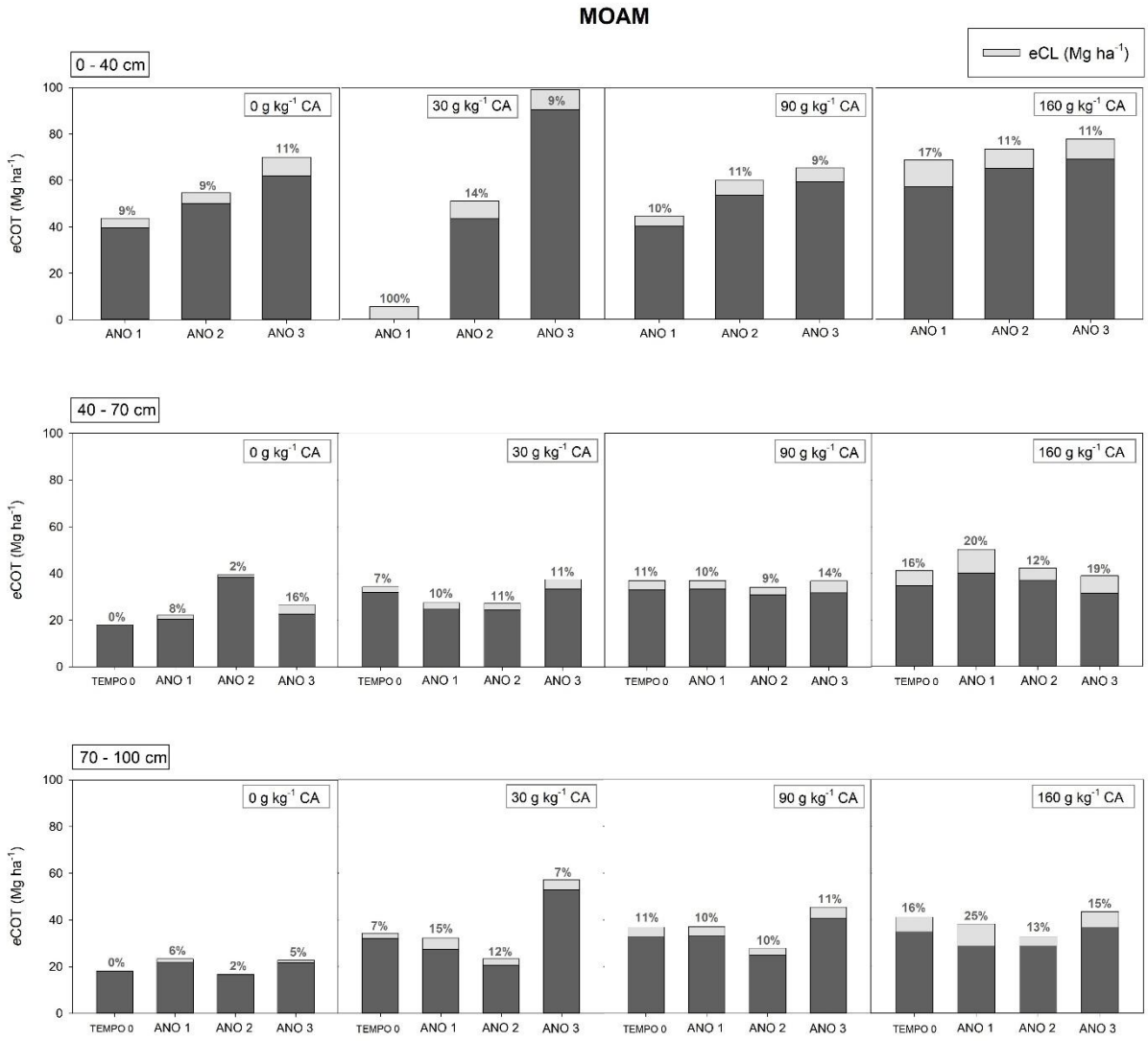


Figura 24. Eficiência líquida de formação da matéria orgânica do solo (EL, % Mg Mg^{-1}). Painel A: estoque inicial de carbono orgânico total (COT) na torta de argila (tempo zero, 0 g kg^{-1} de cama de aviário; 36,0 Mg ha^{-1}) e quantidade de C adicionada ao solo por meio das doses de CA, considerando o teor de C da cama de aviário igual a 420 g kg^{-1} (30 g kg^{-1} CA: 115,0 Mg ha^{-1}; 90 g kg^{-1} CA: 345,2 Mg ha^{-1}; 160 g kg^{-1} CA: 613,7 Mg ha^{-1}). Painel B: incremento do COT no solo (Mg ha^{-1}) ao longo do tempo, em resposta à aplicação de CA e ao cultivo de braquiária. A EL calculada para o ANO 3 estima quanto do C adicionado via cama de aviário foi efetivamente incorporado à MOS.

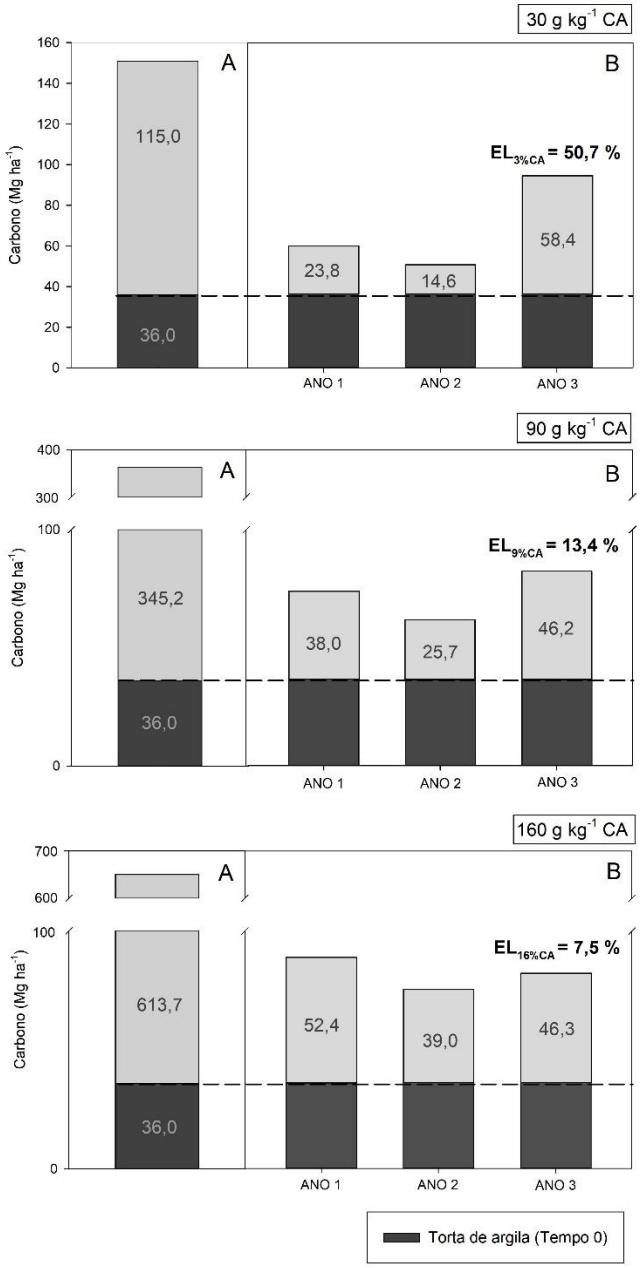


Figura 25. Concentração de dióxido de carbono (CO_2, ppm) ao longo do perfil do solo (10-100 cm) para os tratamentos com diferentes doses de cama de aviário: T2 (0 g kg^{-1}), T3 (30 g kg^{-1}), T4 (90 g kg^{-1}) e T5 (160 g kg^{-1}) e para cada mês estudado (nov/22, dez/22, jan/23, fev/23, mar/23, abr/23, mai/23, jun/23, ago/23, set/23, out/23, nov/23, dez/23, out/24, nov/24 e fev/25).