

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**QUALIDADE DO COMPOSTO ORGÂNICO DE RESÍDUOS DE INCUBATÓRIOS
AVÍCOLAS: EFEITOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E NO
DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays* L.)**

Franciely Vides da Silva

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FRANCIELY VIDES DA SILVA

QUALIDADE DO COMPOSTO ORGÂNICO DE RESÍDUOS
DE INCUBATÓRIOS AVÍCOLAS: EFEITOS NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E NO
DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays* L.)

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Rio Claro - SP
2026

S586q

Silva, Franciely Vides da

Qualidade do composto orgânico de resíduos de incubatórios avícolas : efeitos nas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do milho (*Zea mays* L.) / Franciely Vides da Silva. -- Rio Claro, 2026

107 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

1. compostagem. 2. resíduos de incubatórios avícolas. 3. composto orgânico. 4. propriedades físicas do solo. 5. qualidade do solo. I. Título.

FRANCIELY VIDES DA SILVA

QUALIDADE DO COMPOSTO ORGÂNICO DE RESÍDUOS
DE INCUBATÓRIOS AVÍCOLAS: EFEITOS NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E NO
DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays* L.)

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Comissão Examinadora

Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (orientador)

Marcelo Loureiro Garcia

Vânia Silvia Rosolen

Rio Claro, 22 de junho de 2026.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, pela força e por me guiar ao longo de toda esta caminhada, permitindo que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Genaro Vieira da Silva e Cintia Lucia Vides, e ao meu namorado, Caio Vinicius Botacini, pelo apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos, especialmente nos períodos mais desafiadores desta jornada.

À empresa Bio Rossi Compostagem Ltda., por permitir a realização deste estudo e pelo suporte oferecido. Em especial, agradeço a Rodrigo Alberto Rossi e a José Antonio Rossi pela atenção, colaboração e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Gabriel Alves, pelo auxílio prestado durante a realização deste estudo, contribuindo com apoio, sugestões e colaboração em diferentes etapas da pesquisa.

Ao Bruno Oliveira Garcia, pelas orientações, pelo suporte técnico e pela contribuição significativa ao longo deste período.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro, por acreditar na proposta desta pesquisa e pelo apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Profa. Dra. Vania Silva Rosolen, pela valiosa contribuição e pelo compartilhamento de seu amplo conhecimento, essenciais para a realização deste estudo.

À Profa. Dra. Renata Cristina Bovi, pela colaboração e viabilização das análises laboratoriais realizadas ao longo desta pesquisa, bem como pela atenção e disponibilidade durante este período.

Ao Alan de Oliveira, pelo suporte prestado durante a coleta do solo e na realização das análises físicas.

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

“Sonhos não funcionam a menos que você trabalhe por eles.”
(John C. Maxwell)

RESUMO

A geração de resíduos em incubatórios avícolas demanda alternativas ambientalmente adequadas para seu aproveitamento, sendo a compostagem uma estratégia promissora para sua valorização e reinserção em sistemas produtivos. O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de composto orgânico produzido a partir desses resíduos sobre as propriedades físicas do solo e o desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays* L.) como planta bioindicadora. O experimento foi conduzido em vasos de 25 L, durante 53 dias, sob condições controladas de umidade, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos em triplicata: T1 (sem adubação), T2 (40 t ha⁻¹ de composto orgânico), T3 (500 kg ha⁻¹ de NPK 04-14-08) e T4 (40 t ha⁻¹ de composto orgânico associado a 250 kg ha⁻¹ de NPK 04-14-08). Foram avaliadas a densidade do solo, a porosidade total, a altura das plantas, o número de folhas, o diâmetro do colmo e a biomassa seca do milho. Os tratamentos com composto orgânico promoveram melhorias nos atributos físicos do solo, com redução da densidade e aumento da porosidade. Essas alterações resultaram em condições mais favoráveis ao desenvolvimento radicular e ao crescimento das plantas. Os resultados evidenciam o potencial agronômico do composto orgânico oriundo de resíduos de incubatórios avícolas como alternativa sustentável, contribuindo para a melhoria da qualidade do solo e para sistemas agrícolas mais eficientes.

Palavras-chave: compostagem; resíduos de incubatórios avícolas; composto orgânico; propriedades físicas do solo; qualidade do solo.

ABSTRACT

The generation of waste from poultry hatcheries requires environmentally appropriate management alternatives, with composting emerging as a promising strategy for its valorization and reintegration into productive systems. This study aimed to evaluate the effects of applying organic compost produced from these residues on soil physical properties and the initial development of maize (*Zea mays* L.) as a bioindicator plant. The experiment was conducted in 25 L pots over 53 days under controlled moisture conditions, using a completely randomized design with four treatments in triplicate: T1 (no fertilization), T2 (40 t ha⁻¹ of organic compost), T3 (500 kg ha⁻¹ of NPK 04-14-08), and T4 (40 t ha⁻¹ of organic compost combined with 250 kg ha⁻¹ of NPK 04-14-08). Soil bulk density, total porosity, plant height, leaf number, stem diameter, and maize dry biomass were evaluated. Treatments with organic compost improved soil physical properties by reducing bulk density and increasing porosity, resulting in more favorable conditions for root development and plant growth. These results highlight the agronomic potential of organic compost derived from poultry hatchery waste as a sustainable alternative for improving soil quality and promoting more efficient agricultural systems.

Keywords: composting; poultry hatchery waste; organic compost; soil physical properties; soil quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva padrão da temperatura registrada durante o processo de compostagem	23
Figura 2 - Localização da área experimental no município de Rio Claro – SP.....	32
Figura 3 - Vista externa da casa de vegetação do CEA.....	33
Figura 4 - Mapa de localização do ponto de coleta	34
Figura 5 - Vista da área correspondente ao ponto de coleta.....	34
Figura 6 - Procedimento de coleta do solo: a) coleta com anel volumétrico; b) acondicionamento das amostras para análise laboratorial; c) acondicionamento do solo destinado aos vasos	35
Figura 7 - Uso e ocupação do solo na área de estudo.....	36
Figura 8 - Mapa de solos da área de estudo.....	37
Figura 9 - Execução dos ensaios: a) <i>Slaking Test</i> ; b) <i>Crumb Test</i>	39
Figura 10 – Conjunto de peneiras utilizadas na determinação do índice de estabilidade de agregados (IEA).....	40
Figura 11 - Processo de origem do composto orgânico na empresa fornecedora: a) resíduo de incubatório utilizado no processo de compostagem; b) leira com sistema de aeração forçada; c) monte selecionado para coleta do material.....	41
Figura 12 - Formação da leira experimental para o processo de maturação do composto orgânico	42
Figura 13 - Monitoramento e controle do processo de compostagem: a) inserção da sonda metálica no composto para medição de temperatura, umidade e pH; b) correção da umidade com regador de 5 L; c) revolvimento manual da leira com enxada	43
Figura 14 - Amostra representativa de composto orgânico após peneiramento em malha de 4 mm.....	44
Figura 15 - Padronização de volumes em vaso experimental	49
Figura 16 - Montagem do experimento	51
Figura 17 - Peneiramento do solo e composto orgânico: a) composto orgânico retido na peneira; b) composto orgânico peneirado; c) solo retido na peneira; d) solo peneirado	52
Figura 18 - Fundo do vaso com malha de poliéster (200 <i>mesh</i>) para retenção de partículas ...	53
Figura 19 - Esquema representativo da semeadura e aplicação de fertilizantes nos vasos: a) distribuição das sementes; b) profundidade da semeadura e posicionamento do NPK; c) profundidade da semeadura e aplicação do composto orgânico.....	54
Figura 20 - Solo retido nas malhas - IEA	57
Figura 22 - Média da variação da umidade do solo nos tratamentos ao longo do período experimental	69

Figura 23 - Volume de água aplicado nos tratamentos ao longo do período experimental	69
Figura 24 - Crescimento médio da altura do milho ao longo de 53 dias por tratamento	71
Figura 25 - Evolução do estágio fenológico médio do milho ao longo de 53 dias por tratamento	73
Figura 26 - Diâmetro médio do colmo do milho ao final do experimento por tratamento	75
Figura 27 - Biomassa seca média da parte aérea e das raízes do milho por tratamento	77
Figura 28 - Densidade média do solo ao final do experimento por tratamento	80
Figura 29 - Porosidade média do solo ao final do experimento por tratamento	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nutrientes totais fornecidos pelos insumos em cada tratamento.....	48
Tabela 2 - Parâmetros e classificação dos ensaios de <i>Slaking Test</i> e <i>Crumb Test</i>	56
Tabela 3 - Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) do solo	56
Tabela 4 - Caracterização química do solo.....	58
Tabela 5 - Volume de água adicionado durante as intervenções de umidificação da leira	63
Tabela 6 - Análise química do composto orgânico	65
Tabela 7 - Teor de umidade e frações de sólidos do composto orgânico maturado.....	67
Tabela 8 - Média do índice de estabilidade dos agregados (IEA) do solo por tratamento.....	84
Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios de desagregação (<i>Slaking Test</i>) e dispersão (<i>Crumb Test</i>) do solo por tratamento	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
APHA	American Public Health Association
ATP	Adenosina trifosfato
C/N	Relação carbono/nitrogênio
CO	Carbono orgânico
CEA	Centro de Estudos Ambientais
CEAPLA	Centro de Análise e Planejamento Ambiental
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Capacidade de troca catiônica
CV	Coefficiente de variação
DAE	Dias após a emergência
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DRY	Faixa seca de umidade do composto
DRY+	Faixa muito seca de umidade do composto
Ds	Densidade do solo
DP	Desvio padrão
e	Índice de vazios
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GPS	Global Positioning System
H	Teor de umidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Índice de estabilidade de agregados
ITPS	Intergovernmental Technical Panel on Soils
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MO	Matéria orgânica
Mc	Massa remanescente
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
n	Porosidade total do solo
NOR	Faixa normal de umidade do composto

NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
Pea	Peso dos agregados estáveis
Pt	Peso total da amostra
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SB	Soma de bases
SF	Sólidos fixos
SP	São Paulo
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
U	Teor gravimétrico
V	Volume
V%	Saturação por bases
WET	Faixa úmida de umidade do composto
WET+	Faixa muito úmida de umidade do composto

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
Al ³⁺	Alumínio trocável
B	Boro
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
cm ³	Centímetro cúbico
Cu	Cobre
Fe	Ferro
g	Grama
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
H ⁺ + Al	Acidez potencial
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
kg/kg	Quilograma por quilograma
kg/ha	Quilogramas por hectare
L	Litro
m	Metro
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
Na	Sódio
P	Fósforo
P (resina)	Fósforo extraído por resina
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
pH (CaCl ₂)	Potencial hidrogeniônico em solução de CaCl ₂
S	Enxofre
t/ha	Toneladas por hectare
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 JUSTIFICATIVA	19
3 OBJETIVOS	20
3.1 Objetivo geral	20
3.2 Objetivos específicos	20
4 REFERENCIAL TEÓRICO	21
4.1 Resíduos de incubatórios avícolas	21
4.2 Compostagem como tecnologia de tratamento.....	22
4.3 Controle de parâmetros no processo de compostagem.....	24
4.4 Caracterização do composto orgânico e uso agrícola.....	25
4.5 Qualidade do solo e manejo com matéria orgânica.....	26
4.5.1 Importância dos indicadores físicos da qualidade do solo	27
4.6 Cultura do milho utilizada como planta bioindicadora	28
4.7 Cultivo convencional e adubação mineral.....	29
5 METODOLOGIA.....	32
5.1 Área experimental.....	32
5.2 Caracterização do solo.....	33
5.2.1 Coleta do solo	33
5.2.2 Análises do solo.....	37
5.3 Processo de compostagem e caracterização do composto orgânico.....	40
5.3.1 Coleta e preparação do composto.....	40
5.3.2 Monitoramento e controle do processo	42
5.3.3 Análises laboratoriais do composto orgânico	44
5.4 Delineamento Experimental	47
5.5 Cálculo e padronização das doses em escala de vasos	48
5.6 Condução do experimento	51

5.7 Variáveis avaliadas	54
5.7.1 Crescimento e desenvolvimento da planta	54
5.7.2 Propriedades físicas do solo após os tratamentos	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
6.1 Caracterização do solo.....	56
6.2 Dinâmica do processo de compostagem.....	59
6.2.1 Temperatura da leira.....	59
6.2.2 Umidade da leira.....	60
6.2.3 pH da leira	61
6.2.4 Observações operacionais e características do processo	62
6.3 Caracterização do composto orgânico.....	64
6.4 Resposta dos tratamentos no experimento em vasos.....	68
6.4.1 Controle da umidade nos vasos ao longo do experimento	68
6.4.2 Parâmetros de crescimento e desenvolvimento do milho.....	71
6.4.2.1 Monitoramento da altura do milho	71
6.4.2.2 Monitoramento do número de folhas do milho	73
6.4.2.3 Diâmetro do colmo ao final do experimento	75
6.5.2.4 Biomassa seca ao final do experimento.....	76
6.4.3 Influência do aporte de nutrientes entre os tratamentos	79
6.4.4 Indicadores físicos da qualidade do solo	80
6.4.4.1 Densidade do solo.....	80
6.4.4.2 Porosidade do solo.....	81
6.4.4.3 Estabilidade estrutural do solo.....	83
7 CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A – PLANILHA DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM	99

APÊNDICE B – CÁLCULOS DE SÓLIDOS E UMIDADE.....	101
APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE NO VASO	102
APÊNDICE D – CÁLCULOS COM O MÉTODO DE CRAVAÇÃO DO ANEL	103
APÊNDICE E – MONITORAMENTO E CONTROLE DA UMIDADE.....	104

1 INTRODUÇÃO

A cadeia avícola brasileira tem registrado crescimento contínuo na produção. Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), a produção de carne de frango no país em 2023 foi de aproximadamente 14,883 milhões de toneladas, representando aumento em relação aos 14,524 milhões de toneladas produzidas em 2022. Esse cenário de expansão implica maior produção de ovos férteis destinados à incubação e, conseqüentemente, na geração de volumes expressivos de resíduos ao longo do processo produtivo (KOBASHIGAWA et al., 2008).

Em incubatórios de frangos de corte, são gerados, em média, 0,16 kg de resíduos em matéria seca para cada 1 kg de frangos nascidos, sendo que 79% do descarte total ocorre na fase de eclosão (ORRICO et al., 2020). O elevado volume desses resíduos, associado à escala de produção, constitui um desafio ambiental e econômico, especialmente quanto à sua destinação adequada e à mitigação de impactos, demandando o desenvolvimento de estratégias eficientes de manejo (DIAS, 2021).

Nesse sentido, a compostagem configura-se como uma alternativa tecnicamente consolidada para o tratamento de resíduos orgânicos. O processo promove a transformação da matéria orgânica em um composto estabilizado, passível de utilização agrícola. Além de reduzir passivos ambientais, possibilita a reciclagem de nutrientes e contribui para a adoção de práticas produtivas mais sustentáveis.

Quando aplicado ao solo, esse composto pode influenciar diretamente sua fertilidade, que assume papel central diante do crescimento populacional e da intensificação da produção agrícola. Tradicionalmente, essa demanda nutricional é suprida por meio do uso de fertilizantes minerais, especialmente o NPK, que fornece nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), macronutrientes exigidos em maiores quantidades pelas plantas (HOSSAIN; SINGH, 2000). Contudo, ainda que os fertilizantes minerais apresentem vantagens como padronização e facilidade de manejo, seu uso está associado a potenciais impactos ambientais (OGINO; GASQUES, 2023).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2026), as importações de fertilizantes no Brasil atingiram, em 2025, volume recorde de 45,5 milhões de toneladas. Embora o país figure entre os maiores consumidores mundiais de fertilizantes minerais, sua produção interna é insuficiente para suprir a demanda nacional, evidenciando a dependência externa do setor (OLIVEIRA et al., 2023).

Entretanto, o uso excessivo de fertilizantes pode ocasionar efeitos negativos ao meio ambiente, como o acúmulo de nutrientes no solo e em corpos hídricos, favorecendo processos

de eutrofização (AYOUB, 1999). Além disso, sistemas intensivos de exploração agrícola, associados a práticas inadequadas de manejo, contribuem para a degradação das propriedades do solo em seus diferentes aspectos (FAO; ITPS, 2015).

Sob essa perspectiva, o conceito de qualidade do solo passa a ser fundamental para avaliar os efeitos do manejo agrícola, referindo-se à sua capacidade de desempenhar funções produtivas e ambientais, sendo comumente avaliada por meio de indicadores físicos, químicos e biológicos (COTRIM et al., 2022; LOPES et al., 2023).

Diante desse cenário, a incorporação de matéria orgânica ao solo apresenta-se como estratégia de manejo, pois favorece a liberação gradual de nutrientes, reduz perdas por lixiviação e pode racionalizar o uso de fertilizantes minerais, contribuindo para maior eficiência produtiva e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (BRADY; WEIL, 2013; NOVAIS et al., 2007).

Assim, compreender os efeitos do composto orgânico oriundo de resíduos de incubatórios avícolas sobre a qualidade do solo e o desenvolvimento das culturas torna-se fundamental para orientar práticas de manejo mais sustentáveis, fortalecer a valorização desses resíduos e ampliar sua inserção em estratégias de economia circular.

2 JUSTIFICATIVA

O crescimento da atividade avícola tem intensificado a geração de resíduos provenientes de incubatórios, caracterizados por elevada umidade e alto teor de matéria orgânica e proteínas. Quando manejados inadequadamente, esses resíduos podem representar riscos ambientais, como contaminação do solo e de corpos hídricos, além da proliferação microbiana, demandando estratégias de tratamento que reduzam seu potencial poluidor e possibilitem destinação ambientalmente adequada (ADHIKARI et al., 2011; BRASIL, 2010).

A compostagem destaca-se como alternativa tecnicamente consolidada para o tratamento de resíduos avícolas, promovendo a estabilização da matéria orgânica e sua conversão em insumos de valor agregado, alinhando-se aos princípios da economia circular e ao aproveitamento sustentável desses materiais na agricultura (ORRICO et al., 2020; ZHANG; REN; BAI, 2023).

Nesse contexto, a manutenção da qualidade do solo constitui um desafio à sustentabilidade agrícola, reforçando a necessidade de práticas de manejo que preservem e aprimorem suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Assim, a incorporação de fontes orgânicas estabilizadas pode contribuir para a melhoria das condições do solo, com efeitos sobre o cultivo e o desenvolvimento das plantas, tanto quando aplicada isoladamente quanto em associação à adubação mineral (FAO; ITPS, 2015; LAL, 2001; LEHMANN; KLEBER, 2015).

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de gerar informações técnicas sobre o uso do composto oriundo de resíduos de incubatórios avícolas, especialmente quanto aos seus efeitos sobre as propriedades do solo e o desenvolvimento das plantas, contribuindo para a manutenção da qualidade do solo e para a adoção de práticas sustentáveis em sistemas agrícolas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar, em casa de vegetação, os efeitos da aplicação de composto orgânico proveniente de resíduos de incubatórios avícolas sobre as propriedades físicas do solo e o desenvolvimento do milho (*Zea mays* L.), utilizado como planta bioindicadora.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar as alterações nas propriedades físicas do solo em função da aplicação de composto orgânico, adubação mineral NPK e da combinação entre ambos, considerando as condições antes e após os tratamentos.
- Avaliar o crescimento e o desenvolvimento do milho (*Zea mays* L.) sob diferentes tratamentos de adubação orgânica, mineral e combinada.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Resíduos de incubatórios avícolas

O incubatório é uma etapa estratégica da cadeia produtiva avícola, responsável pela transformação biológica de ovos férteis em pintos de um dia, exigindo rigoroso controle das condições ambientais para garantir qualidade e desempenho dos animais (BARACHO et al., 2010).

Durante o processo de incubação, são gerados resíduos sólidos provenientes das perdas embrionárias até a eclosão, incluindo cascas de ovos, ovos inférteis ou inviáveis, embriões não desenvolvidos e pintos mortos, além de material orgânico resultante da decomposição de ovos e tecidos biológicos. Esses resíduos são destinados a diferentes formas de tratamento e disposição final, como compostagem, processamento industrial, incineração ou aterros sanitários (ADHIKARI et al., 2011).

No incubatório, o nascedouro é a etapa que concentra a maior geração de resíduos, por reunir as principais perdas do processo de incubação. Essa produção está diretamente relacionada às perdas embrionárias, que podem ser influenciadas por diferentes fatores. Entre eles, destaca-se a idade das matrizes, a qual interfere na qualidade da postura e na eficiência da incubação. Nesse sentido, observa-se maior geração de resíduos provenientes de ovos de galinhas jovens e de aves em final de ciclo produtivo, em comparação às aves em idade produtiva intermediária (ORRICO et al., 2020).

Segundo Adhikari et al. (2011), os resíduos de incubatórios avícolas apresentam elevado teor de umidade, variando entre 43 e 71%, e, em base seca, possuem teores expressivos de proteínas (33,1%), lipídios (29,0%), fibra (12,1%) e cinzas (21,5%). Dellaaire-Lamontagne et al. (2024) relatam que esses resíduos apresentam pH próximo da neutralidade (6 a 7) e valores energéticos variando de 2.498 a 5.910 cal/g. De acordo com Orrico et al. (2020), o material apresenta 64,7% de sólidos totais e 45,2% de sólidos voláteis, além de 31,3% de carbono, 3,1% de nitrogênio, relação C:N de 10:1. Ilian e Salman (1986) destacam ainda que se trata de um resíduo rico em cálcio, com teor de 22,64% em base seca.

Essas condições favorecem o desenvolvimento de microrganismos patogênicos, tornando esse tipo de resíduo motivo de preocupação tanto para o setor produtivo quanto para os órgãos ambientais e sanitários. O manejo inadequado pode representar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, além de promover a emissão de gases, como o sulfeto de hidrogênio e

outros compostos orgânicos voláteis, bem como favorecer a proliferação de vetores, incluindo insetos, vermes e pequenos roedores (BUGATTI, 2016).

A elevada diversidade e concentração de microrganismos presentes nesses resíduos decorrem da acumulação de material orgânico ao longo do processo produtivo. Estudos indicam que os resíduos avícolas possuem uma composição microbiológica complexa, com a presença de diferentes grupos bacterianos, cuja ocorrência está associada às condições do material, como pH e umidade, refletindo a intensa atividade microbiológica característica desse tipo de resíduo (TERZICH et al., 2000).

O descarte inadequado de resíduos de origem animal no meio ambiente, sem tratamento prévio, pode ocasionar impactos ambientais significativos, especialmente relacionados à contaminação química e microbiológica do solo e dos corpos hídricos, comprometendo a qualidade ambiental e a saúde das populações localizadas no entorno das unidades produtoras (OLIVEIRA et al., 2024).

Dessa forma, os resíduos gerados no processo de incubação devem ser removidos do incubatório logo após o acondicionamento e destinados a sistemas adequados de tratamento, sendo recomendada a adoção de práticas como compostagem ou encaminhamento para unidades de beneficiamento, bem como a terceirização do manejo desses resíduos, como estratégias para reforçar a biossegurança e assegurar o adequado funcionamento do incubatório (EMBRAPA, 2021).

4.2 Compostagem como tecnologia de tratamento

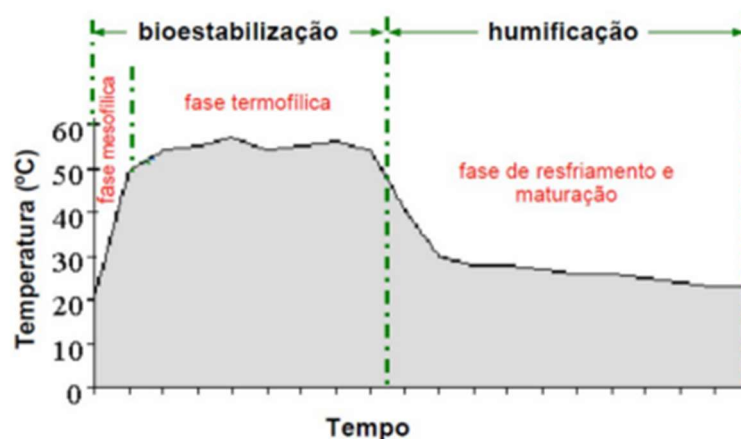
Diante das características dos resíduos gerados em incubatórios avícolas, como o elevado teor de umidade, a rápida decomposição da matéria orgânica e o alto potencial de proliferação microbiana, torna-se indispensável a adoção de tecnologias de tratamento capazes de minimizar os impactos ambientais e os riscos sanitários associados ao seu manejo inadequado. Nesse contexto, a compostagem destaca-se como uma alternativa amplamente empregada para o tratamento de resíduos orgânicos de origem animal, por promover a estabilização da matéria orgânica e a redução da carga patogênica (ORRICO et al., 2020).

A compostagem consiste em um processo biológico aeróbio, no qual micro-organismos utilizam a matéria orgânica como fonte de energia, promovendo sua decomposição e transformação em um material mais estável, conhecido como composto. Esse processo ocorre por meio da conversão da matéria orgânica em dióxido de carbono, água, calor e biomassa

microbiana, resultando na redução do volume dos resíduos e na diminuição do potencial poluidor, quando comparado ao material in natura (LAU, 1992).

Durante o processo de compostagem, o material passa por diferentes fases, caracterizadas principalmente pela variação da temperatura. Inicialmente, ocorre a fase mesofílica, seguida pela fase termofílica, na qual as temperaturas elevadas favorecem a rápida degradação da matéria orgânica e a inativação de microrganismos patogênicos. Posteriormente, o processo entra na fase de resfriamento e maturação, responsável pela estabilização do composto e pela formação de substâncias húmicas, conferindo maior estabilidade química e biológica ao material final (LAU, 1992). A variação típica da temperatura ao longo dessas fases pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Curva padrão da temperatura registrada durante o processo de compostagem



Fonte: KIEHL (1985).

A eficiência da compostagem está diretamente relacionada ao controle de parâmetros operacionais, como umidade, aeração, relação carbono/nitrogênio (C/N), granulometria dos resíduos e temperatura. O manejo inadequado desses fatores pode comprometer a atividade microbiana, favorecer condições anaeróbias e intensificar a emissão de gases indesejáveis, como a amônia, além da geração de odores, aspectos frequentemente associados aos resíduos de incubatórios avícolas (FIALHO et al., 2010).

No âmbito do gerenciamento de resíduos da cadeia produtiva avícola, a compostagem tem se consolidado como uma tecnologia ambientalmente adequada e economicamente viável, especialmente para resíduos provenientes de incubatórios. A adoção desse processo permite a redução de riscos sanitários, a mitigação de impactos ambientais e a transformação dos resíduos em um produto com potencial de uso agrícola, contribuindo para a reciclagem de nutrientes e para a sustentabilidade do setor (ORRICO et al., 2020).

4.3 Controle de parâmetros no processo de compostagem

Diante da complexidade biológica e físico-química envolvida na compostagem, o controle sistemático dos parâmetros operacionais torna-se indispensável para regular a atividade microbiana e a dinâmica de transformação da matéria orgânica. Tais parâmetros influenciam diretamente a eficiência do processo, a estabilidade do material ao longo do tempo e a qualidade do composto obtido. Assim, o monitoramento de variáveis como umidade, temperatura, aeração, relação carbono/nitrogênio (C/N) e pH permite otimizar as condições do meio, assegurando a adequada condução do processo e a obtenção de um produto sanitizado e agronomicamente seguro (VALENTE et al., 2009; GAO et al., 2010).

A aeração destaca-se como um dos fatores mais determinantes para o sucesso da compostagem, pois garante a disponibilidade de oxigênio necessária à respiração dos microrganismos aeróbios responsáveis pela degradação da matéria orgânica (BERTOLDI et al., 1983; FERNANDES; SILVA, 1999). Além de sustentar a atividade biológica, a aeração atua na regulação da velocidade do processo, contribuindo para a minimização de odores e auxiliando no equilíbrio da umidade do material (KIEHL, 2004). O consumo de oxigênio tende a ser mais intenso nas fases iniciais da compostagem, reduzindo-se gradativamente à medida que o material se estabiliza, o que pode indicar a transição para a etapa de cura (VALENTE et al., 2009).

A temperatura constitui um indicativo direto da atividade microbiológica, elevando-se em decorrência da intensa degradação da matéria orgânica. Esse parâmetro também pode sofrer influência das condições climáticas externas, como observado por Amorim et al. (2005), que registraram temperaturas internas mais baixas no inverno em comparação ao verão. A umidade, por sua vez, é essencial para o desenvolvimento das reações metabólicas responsáveis pela liberação de dióxido de carbono e calor. Contudo, teores excessivos podem reduzir a disponibilidade de oxigênio, favorecer condições anaeróbias e comprometer a eficiência do processo (VALENTE et al., 2009).

O pH interfere diretamente na atividade microbiana e apresenta variações ao longo da compostagem em função da formação e posterior degradação de compostos intermediários, tendendo a estabilizar-se conforme o material amadurece. A relação C/N é reconhecida como um dos principais indicadores do equilíbrio nutricional da massa em compostagem, visto que o carbono atua como fonte de energia e o nitrogênio participa da síntese celular. Proporções adequadas favorecem a degradação eficiente e reduzem perdas por volatilização, enquanto desequilíbrios podem retardar o processo (KIEHL, 2004).

Por fim, a granulometria influencia as propriedades físicas do material, especialmente a porosidade e a circulação de ar na massa, impactando diretamente a manutenção das condições aeróbias e o desempenho microbiológico do sistema (BERTOLDI et al., 1983). Dessa forma, a adequação do tamanho das partículas contribui para a estabilidade estrutural do composto ao longo do processo.

4.4 Caracterização do composto orgânico e uso agrícola

A caracterização do composto orgânico compreende a avaliação de seus atributos físicos, químicos e biológicos, os quais permitem determinar seu grau de estabilidade, maturação e aptidão para uso agrícola. A maturação do composto está diretamente relacionada às transformações do carbono ao longo do processo de compostagem. De modo geral, observa-se redução progressiva desse elemento em decorrência da intensa atividade microbiana, sendo o tempo necessário para a estabilização do material fortemente condicionado à relação C/N inicial dos resíduos utilizados (VALENTE et al., 2009). Durante a degradação da matéria orgânica, ocorre diminuição gradual da relação C/N, atingindo valores entre 15:1 e 18:1, considerados indicativos de bioestabilização do material (KIEHL, 2004).

À medida que as frações mais facilmente degradáveis são consumidas, a atividade microbiana característica da fase termofílica tende a declinar, promovendo a redução da temperatura da leira até níveis próximos à temperatura ambiente (VINNERAS; JONSSON, 2002). Nessa etapa, passam a predominar microrganismos mesófilos, responsáveis pela decomposição de compostos mais resistentes, como hemicelulose e lignina, contribuindo para o avanço do processo de humificação (VALENTE et al., 2009; TUOMELA et al., 2000). Com a consolidação dessas transformações, o produto final tende a apresentar pH geralmente entre 7,0 e 8,0 e relação C/N próxima de 10:1, características associadas a um composto devidamente maturado (KIEHL, 1985).

A qualidade do composto orgânico está diretamente relacionada ao seu grau de estabilidade biológica e ao nível de humificação alcançado (LIMA, 2006). Materiais adequadamente maturados não apresentam efeitos fitotóxicos nem restrições ao desenvolvimento vegetal. Entretanto, não há um único parâmetro capaz de definir, de forma isolada, a estabilidade do composto, sendo recomendada a utilização de métodos complementares de avaliação, em razão da complexidade microbiológica envolvida no processo (NEGRO et al., 2000; VALENTE et al., 2009).

Além disso, a maturação envolve alterações quantitativas e qualitativas nas substâncias húmicas, como a humina, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, que influenciam diretamente a qualidade agronômica do produto final. Nesse contexto, a compostagem objetiva a obtenção de um material homogêneo, estável e sanitariamente seguro, apto à utilização como insumo agrícola, desde que atenda aos critérios técnicos e às exigências estabelecidas pela legislação vigente (BARI et al., 2001; VALENTE et al., 2009).

Quando adequadamente maturado, o composto orgânico pode ser utilizado como fonte de nutrientes e matéria orgânica em sistemas agrícolas, promovendo liberação gradual de elementos essenciais às plantas (SEVERINO et al., 2004). Dessa forma, a adequada caracterização do composto constitui etapa fundamental para assegurar sua eficiência agronômica e segurança ambiental.

No contexto da regulamentação brasileira, a qualidade do composto orgânico também é definida por critérios legais. De acordo com a Instrução Normativa MAPA nº 61/2020, fertilizantes orgânicos mistos ou compostos sólidos destinados à agricultura devem apresentar umidade máxima de 50%, nitrogênio total mínimo de 0,5%, carbono orgânico mínimo de 15% e relação C/N máxima de 20, sendo esses parâmetros exigidos para registro e comercialização do produto.

4.5 Qualidade do solo e manejo com matéria orgânica

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de desempenhar funções essenciais ao ecossistema, incluindo a sustentação da produtividade vegetal, a regulação do fluxo de água, a ciclagem de nutrientes e a manutenção da atividade biológica (FAO, 2019). Esse conceito está diretamente relacionado à funcionalidade do solo em sistemas naturais e agrícolas, refletindo sua aptidão em sustentar processos ecológicos fundamentais (KARLEN; STOTT, 1994; LARSON; PIERCE, 1994).

Nesse sentido, a qualidade do solo tem sido amplamente utilizada como um indicador integrador da sustentabilidade, uma vez que reúne atributos físicos, químicos e biológicos em uma abordagem sistêmica (HERRICK, 2000). Solos de maior qualidade tendem a apresentar maior estabilidade estrutural, maior eficiência no uso de nutrientes e maior resiliência frente a distúrbios antrópicos.

Por se tratar de um atributo complexo, a qualidade do solo não pode ser mensurada diretamente, sendo avaliada por meio de indicadores específicos relacionados às suas

propriedades físicas, químicas e biológicas (KARLEN; STOTT, 1994; ANDREWS et al., 2002). Esses indicadores permitem diagnosticar o estado funcional do solo e monitorar alterações decorrentes do uso e manejo, possibilitando a avaliação dos impactos das práticas agrícolas ao longo do tempo (ARAÚJO et al., 2012).

A matéria orgânica do solo constitui um dos principais indicadores da qualidade edáfica, uma vez que influencia simultaneamente atributos físicos, químicos e biológicos. Sua redução compromete a agregação das partículas, a retenção de água, o armazenamento de nutrientes e a atividade microbiana, limitando o potencial produtivo das culturas (FAO; ITPS, 2015).

A manutenção e o aprimoramento da qualidade do solo demandam estratégias capazes de otimizar sua funcionalidade. Entre elas, destaca-se o incremento do teor de matéria orgânica, por promover melhorias estruturais, ampliar a capacidade de retenção hídrica e elevar a capacidade de troca catiônica (LAL, 2001; LEHMANN; KLEBER, 2015).

No manejo da matéria orgânica, a definição de doses adequadas é fundamental, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e as alterações nas propriedades do solo. De modo geral, as taxas podem ser classificadas em baixas (até 15 t ha⁻¹), médias (15–30 t ha⁻¹) e altas (acima de 30 t ha⁻¹), considerando a concentração de nutrientes do material: produtos mais concentrados demandam menores volumes, enquanto materiais menos nutritivos requerem aplicações maiores. Independentemente da faixa adotada, é indispensável avaliar a carga total de nutrientes e demais elementos incorporados ao solo (KIEHL, 2010 apud ZONTA et al., 2021).

Nesse contexto, compostos orgânicos provenientes de resíduos agroindustriais apresentam potencial como estratégia de manejo do solo, especialmente quando comparados à adubação mineral. A análise dos atributos físicos do solo, associada ao crescimento e desenvolvimento do milho, permite avaliar os efeitos dessas práticas de manejo sobre a qualidade do solo e o desempenho da cultura.

4.5.1 Importância dos indicadores físicos da qualidade do solo

A qualidade física do solo constitui um dos principais determinantes do desempenho de sistemas agrícolas, uma vez que controla processos fundamentais como o crescimento radicular, o armazenamento e a disponibilidade de água e nutrientes, as trocas gasosas e a atividade biológica. Dentre os principais indicadores físicos da qualidade do solo, destacam-se a densidade, a porosidade e a estabilidade de agregados, amplamente utilizados devido à sua sensibilidade às alterações impostas pelo manejo (ARSHAD et al., 1996; CHAVEIRO et al.,

2022). Tais indicadores têm se consolidado como ferramentas relevantes para a identificação de processos de degradação, fornecendo subsídios técnicos para a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis e para a recuperação da qualidade do solo (COTRIM et al., 2022).

A densidade do solo é reconhecida como um dos atributos físicos mais dinâmicos, sendo influenciada tanto por características intrínsecas, como a textura, quanto por fatores externos relacionados ao manejo, incluindo o tráfego de máquinas e as condições ambientais (ARSHAD et al., 1996). Adicionalmente, apresenta elevada variabilidade espacial, em função do tipo de solo e da profundidade de amostragem (PIRES; ROSA; TIMM, 2011). Já a porosidade reflete a organização estrutural do solo e a distribuição do tamanho dos poros, sendo sua interpretação mais consistente quando considerada a distinção entre macro e microporos. Processos como compactação, ciclos de umedecimento e secagem, impacto de gotas de chuva e baixos teores de matéria orgânica contribuem para a redução de macroporos, comprometendo a infiltração de água, a aeração e o crescimento radicular (ARSHAD et al., 1996).

A estabilidade de agregados, por sua vez, é considerada um dos indicadores mais representativos da qualidade estrutural do solo, apresentando forte relação com sua suscetibilidade à erosão e com processos hidrológicos e mecânicos. Esse atributo influencia diretamente a infiltração e retenção de água, a aeração, a resistência à penetração de raízes, bem como a ocorrência de selamento superficial e erosão hídrica e eólica. Sua avaliação está associada ao equilíbrio entre forças de coesão das partículas e forças desagregantes aplicadas, podendo variar conforme o método utilizado (ARAÚJO et al., 2012). Nesse contexto, a matéria orgânica do solo assume papel central, atuando como agente cimentante na formação e estabilização de agregados. A sua presença favorece a melhoria de atributos como densidade, porosidade, infiltração e retenção de água (COTRIM et al., 2022).

Por fim, a avaliação da qualidade física do solo não deve se basear em indicadores isolados, uma vez que esses atributos respondem de forma integrada às alterações no manejo (FREITAS et al., 2017). A análise conjunta de indicadores físicos, químicos e biológicos permite uma interpretação mais robusta das condições estruturais do solo e de sua capacidade de sustentar o crescimento vegetal (COTRIM et al., 2022; ARAÚJO et al., 2012).

4.6 Cultura do milho utilizada como planta bioindicadora

O milho (*Zea mays* L.) é uma espécie anual pertencente à família Poaceae, amplamente cultivada em sistemas agrícolas devido à sua importância econômica e à elevada resposta às

condições de fertilidade do solo. De acordo com a Embrapa (2018), trata-se de uma cultura exigente em nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio, apresentando desenvolvimento diretamente influenciado pelas características físicas e químicas do solo, como disponibilidade de nutrientes, estrutura e teor de matéria orgânica. Dessa forma, o milho tem sido amplamente utilizado em estudos para avaliar os efeitos de práticas de manejo sobre o desempenho vegetal, refletindo as condições do solo.

O uso do milho em experimentos realizados sob condições controladas é fundamentado em estudos que analisam parâmetros morfológicos e de crescimento como indicadores da qualidade do solo (MARTINS et al., 2024). A avaliação de variáveis morfológicas, como altura de plantas e número de folhas e diâmetro do colmo é amplamente empregada em estudos que investigam a eficiência de fertilizantes orgânicos, minerais e da associação entre ambos. Nesse contexto, Santos et al. (2017) conduziram experimentos em vasos com capacidade de 25 L de solo, dimensão considerada adequada para o desenvolvimento do sistema radicular do milho e para a avaliação consistente dos efeitos de diferentes doses de fertilizante sobre o crescimento da cultura.

Além dos parâmetros morfológicos, a produção de biomassa vegetal tem sido empregada como indicador do desenvolvimento do milho em função das condições edáficas. Carmo (2025) avaliou o desenvolvimento do milho por meio da determinação da massa seca de folhas, colmos e raízes, utilizando esse parâmetro como indicador dos efeitos dos tratamentos aplicados ao solo sobre o crescimento vegetal. Segundo o autor, a massa seca constitui um indicador integrado da disponibilidade de nutrientes e das condições físicas do solo, permitindo a avaliação dos efeitos de diferentes estratégias de manejo sobre o desempenho da cultura, sendo observados incrementos significativos na biomassa nas condições de maior disponibilidade nutricional.

Assim, o milho constitui uma ferramenta experimental eficiente para avaliar a efetividade de compostos orgânicos e comparar diferentes estratégias de adubação, evidenciando a relação entre manejo do solo, fertilidade e desempenho vegetal (SANTOS et al., 2017; CARMO, 2025; MARTINS et al., 2024).

4.7 Cultivo convencional e adubação mineral

A agricultura moderna consolidou-se com o uso de fertilizantes minerais, cuja aplicação visa repor nutrientes removidos pelas colheitas e manter a fertilidade do solo (SOUSA;

LOBATO, 2004). A adubação contribuiu para a intensificação produtiva e para a manutenção da capacidade agrícola das áreas cultivadas, sendo considerada um insumo estratégico para melhorar os rendimentos (BRUNELLE et al., 2015; SINHA et al., 2022). Entretanto, o uso indiscriminado desses insumos pode ocasionar impactos ambientais, como contaminação das águas e degradação do solo (AYOUB, 1999).

O fertilizante mineral NPK é o principal insumo utilizado na agricultura, fornecendo os macronutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. O nitrogênio contribui para o crescimento e a síntese de proteínas (HOSSAIN; SINGH, 2000; DUARTE et al., 2021), o fósforo atua nos processos energéticos celulares por meio do ATP, e o potássio regula o balanço hídrico e a fotossíntese (OLIVEIRA et al., 2021), fatores determinantes para a qualidade e produtividade das culturas (DIAS et al., 2020).

Além dos fertilizantes minerais, alternativas orgânicas têm sido cada vez mais utilizadas na agricultura. Segundo Zonta et al. (2021), o uso de fertilizantes orgânicos tem se ampliado em razão dos benefícios promovidos aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, refletindo positivamente na produtividade das culturas. No entanto, quando comparados aos fertilizantes minerais NPK, esses materiais apresentam, em geral, menores teores de nutrientes e maior variabilidade na composição, podendo ocorrer desbalanceamento nutricional quando a dose é definida com base no elemento mais limitante. A liberação de nutrientes também difere, pois o N e o P dependem da mineralização da matéria orgânica, resultando em fornecimento gradual, enquanto o K é disponibilizado mais rapidamente. Assim, sua recomendação exige análise prévia dos teores totais, especialmente de N, P e K, e ajuste às condições do solo e às exigências da cultura.

Estudos realizados em sistemas de cultivo de milho demonstram que a adubação orgânica pode proporcionar respostas produtivas e melhorias nos atributos do solo comparáveis às obtidas com fertilização mineral. Em um experimento de longa duração, a aplicação de 40 m³ ha⁻¹ de composto orgânico resultou em produtividade de milho semelhante à obtida com 500 kg ha⁻¹ de NPK 04-14-08 (GOMES et al., 2005).

De forma semelhante, Mantovani e Spadon (2017) verificaram que a aplicação de até 40 Mg ha⁻¹ de composto orgânico promoveu melhorias na fertilidade do solo, sendo que a dose de 30 Mg ha⁻¹ proporcionou produtividade de grãos comparável à fertilização mineral. Além disso, uma meta-análise conduzida por Wei et al. (2020) demonstrou que a substituição parcial de fertilizantes minerais por orgânicos em sistemas de milho por períodos iguais ou superiores a três anos aumentou os teores de matéria orgânica e nitrogênio total do solo, além de melhorar a agregação, a capacidade de retenção de água e a produtividade da cultura. Assim, a

comparação entre a adubação mineral (NPK) e o composto orgânico permite avaliar o potencial desse insumo como alternativa ou complemento à fertilização convencional.

5 METODOLOGIA

5.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Centro de Estudos Ambientais (CEA), vinculado à Universidade Estadual Paulista (Unesp), campus de Rio Claro – SP, durante o período de 13/03/2026 a 04/05/2026. A área experimental está situada nas coordenadas 22°23'58.25"S e 47°32'35.43"W, cuja localização geográfica encontra-se ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Localização da área experimental no município de Rio Claro – SP



Fonte: Elaborada pela autora.

O cultivo foi realizado em ambiente protegido, sob condições de luminosidade natural e temperatura ambiente (Figura 3), visando minimizar a interferência de precipitações pluviométricas.

Figura 3 - Vista externa da casa de vegetação do CEA



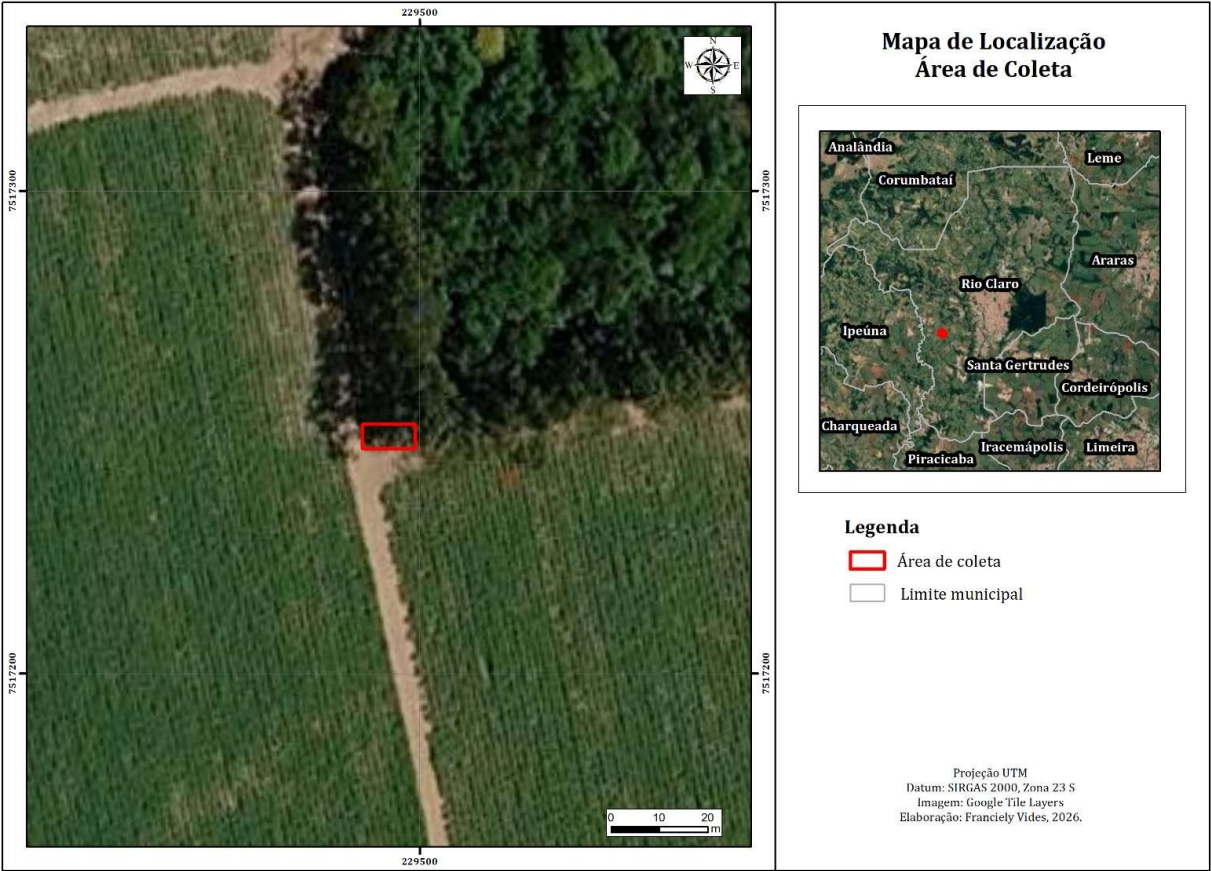
Fonte: Elaborada pela autora.

5.2 Caracterização do solo

5.2.1 Coleta do solo

A coleta do solo foi realizada no dia 10/03/2026, no período da manhã, em uma área previamente definida denominada “Campo do Cocho”, localizada no município de Rio Claro – SP. A localização do ponto de coleta foi registrada por meio de um receptor GPS portátil, modelo Garmin eTrex 10, fornecendo as coordenadas geográficas 22°25'46.8" S e 47°37'40.8" W, além da altitude de 625 m acima do nível do mar, garantindo a correta identificação espacial da área amostrada (Figuras 4 e 5).

Figura 4 - Mapa de localização do ponto de coleta



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5 - Vista da área correspondente ao ponto de coleta



Fonte: Elaborada pela autora.

Previamente à coleta, realizou-se a limpeza superficial da área, com a remoção de restos vegetais e materiais orgânicos presentes no solo, utilizando-se uma enxada, a fim de evitar interferências nos resultados. A coleta foi realizada na profundidade de 0-20 cm, empregando-se um amostrador com anéis volumétricos para determinação da massa específica do solo, cuja inserção foi auxiliada por martelo de borracha (Figura 6A), garantindo a padronização das amostras. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas como “P1” (Figura 6B).

Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas, destinadas respectivamente às análises iniciais físicas e químicas do solo. As amostras indeformadas foram utilizadas para determinação da massa específica do solo, porosidade e ensaios de estabilidade de agregados, enquanto as amostras deformadas foram empregadas nas análises químicas.

Para o experimento em vasos, foram coletados aproximadamente 400 kg de solo com o auxílio de uma enxada, também acondicionados e identificados como “Solo P1”, assegurando a rastreabilidade do material em todas as etapas do estudo (Figura 6C).

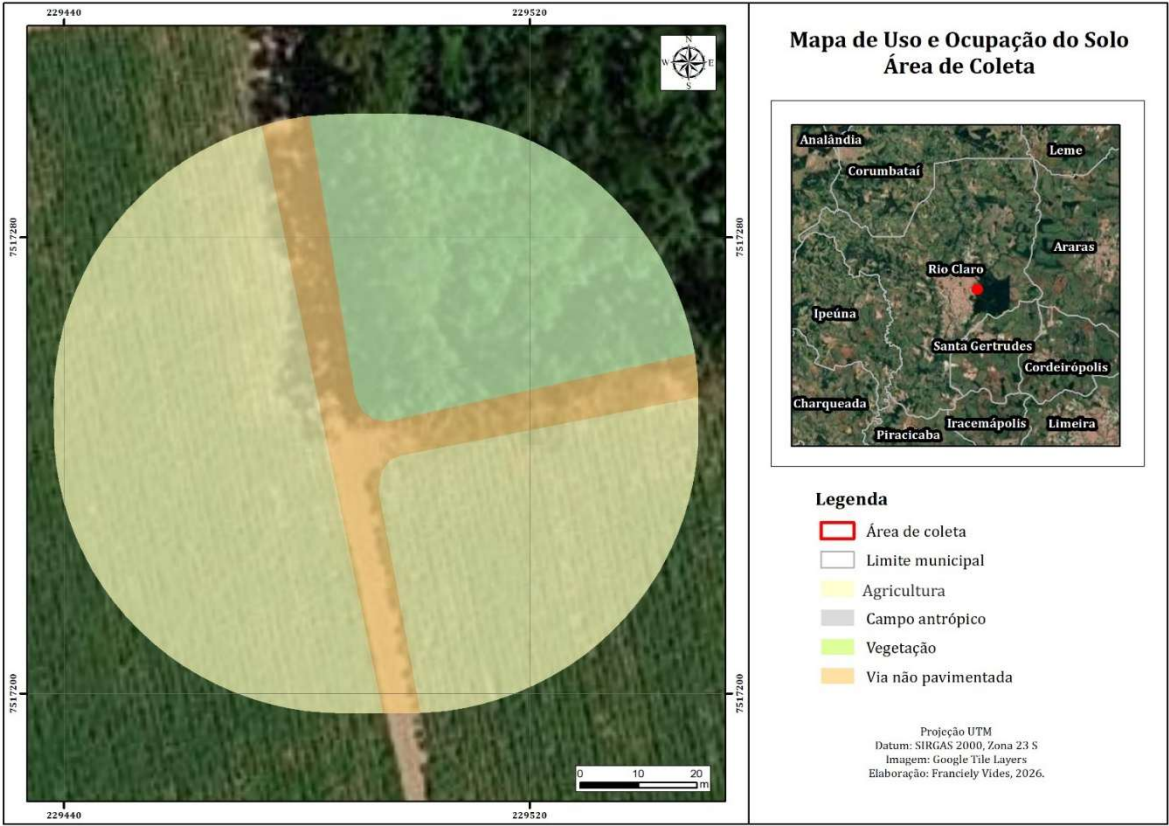
Figura 6 - Procedimento de coleta do solo: a) coleta com anel volumétrico; b) acondicionamento das amostras para análise laboratorial; c) acondicionamento do solo destinado aos vasos



Fonte: Elaborada pela autora.

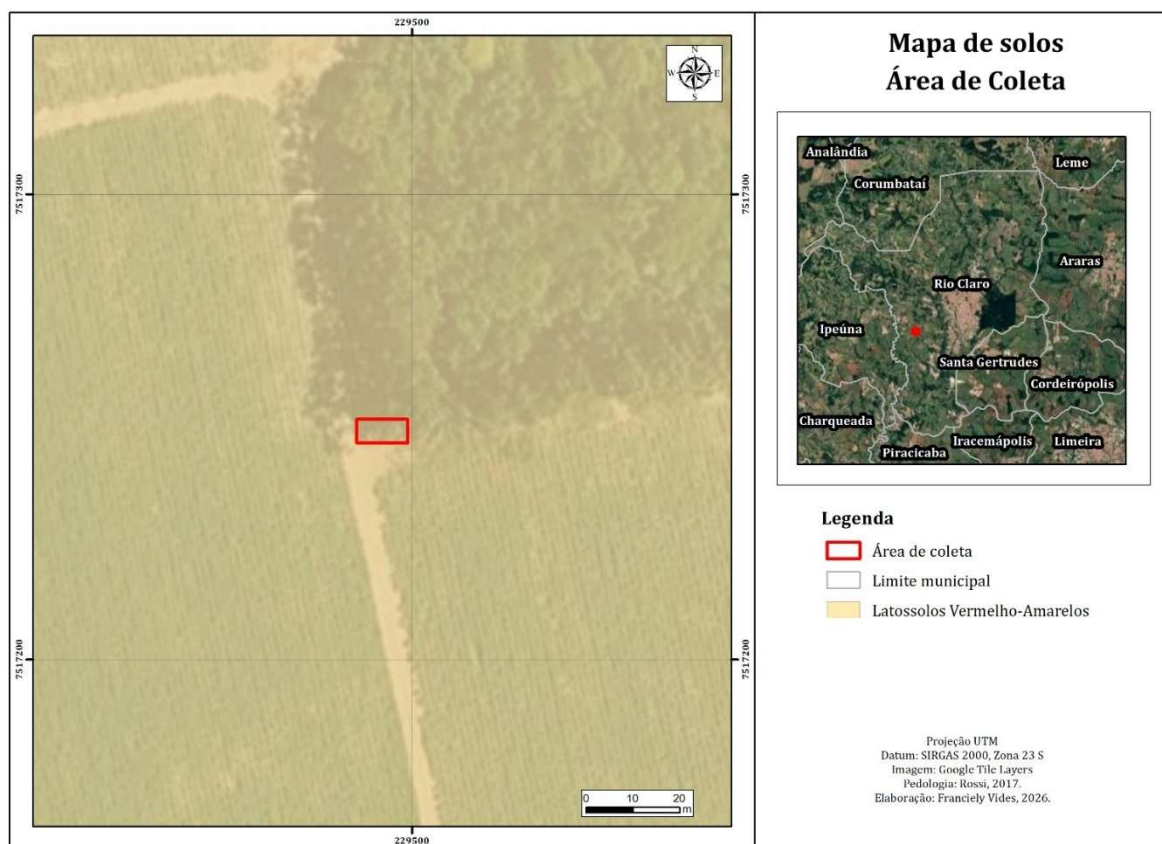
Para caracterizar a área de estudo, foram obtidos mapas temáticos de uso e ocupação do solo e de pedologia, com o objetivo de documentar as características espaciais da área (Figuras 7 e 8).

Figura 7 - Uso e ocupação do solo na área de estudo



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 8 - Mapa de solos da área de estudo



Fonte: Elaborada pela autora.

5.2.2 Análises do solo

As análises físicas do solo foram realizadas no Laboratório de Geotécnica (Unesp – Rio Claro), incluindo a determinação da densidade do solo, porosidade, ensaio de desagregação (*Slaking Test*), ensaio de dispersão (*Crumb Test*) e avaliação do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA).

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme metodologia descrita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Comunicado Técnico 154), sendo calculada conforme a Equação (1):

$$Ds = \frac{Ms}{V} \quad (1)$$

onde:

Ds = densidade do solo (g cm^{-3});

Ms = massa de solo seco (g);

V = volume do solo (cm^3).

A porosidade total do solo foi calculada a partir do índice de vazios, o qual foi obtido com base na massa específica seca do solo e na massa específica das partículas sólidas, conforme a Equação (2).

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100 \quad (2)$$

onde:

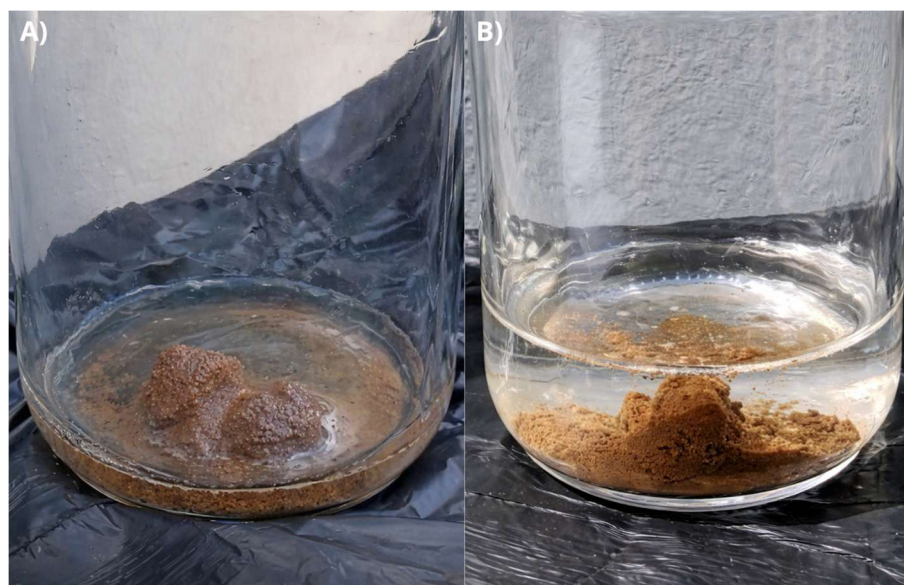
n = porosidade total do solo (%);

e = índice de vazios do solo.

O ensaio *Slaking Test* foi conduzido segundo o sistema de classificação de Holmgren e Flanagan (1977), utilizando amostras indeformadas cúbicas parcialmente submersas em água, com registro do tempo de saturação, início de fissuração e desagregação, permitindo classificar o comportamento do solo quanto à erodibilidade (Figura 9a). Os resultados foram enquadrados nas seguintes categorias: sem resposta (manutenção da forma e tamanho originais), abatimento (desintegração com formação de pilha de material desestruturado), fraturamento (quebra em fragmentos mantendo as faces externas) e dispersão (formação de nuvem coloidal com perda progressiva da estrutura).

O *Crumb Test* foi empregado para avaliar o grau de dispersão das partículas, por meio da observação da turbidez da água e da formação de nuvem coloidal (Figura 9b), sendo classificado em quatro graus de reação: Grau 1 – sem reação (amostra inalterada e água límpida), Grau 2 – pequena reação (leve turbidez), Grau 3 – reação moderada (turbidez com deposição de partículas no fundo do béquer) e Grau 4 – forte reação (formação intensa de nuvem coloidal e elevada turbidez da água) (ABNT, 1996).

Figura 9 - Execução dos ensaios: a) *Slaking Test*; b) *Crumb Test*



Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, o índice de estabilidade de agregados (IEA) foi determinado conforme a Equação (3), de acordo com a metodologia descrita por Salton et al. (2017), utilizando-se o conjunto de peneiras, conforme apresentado na Figura 10.

$$IEA = \frac{P_{ea}}{P_t} * 100 \quad (3)$$

onde:

IEA = índice de estabilidade de agregados (%);

P_{ea} = peso dos agregados estáveis, descontada a fração < 0,25 mm (g);

P_t = peso total da amostra (g).

Figura 10 – Conjunto de peneiras utilizadas na determinação do índice de estabilidade de agregados (IEA)



Fonte: Elaborada pela autora.

Além das análises físicas realizadas no Laboratório de Geotécnica, 3 porções com 300 g das amostras de solo foram peneiradas em malha de 2 mm e encaminhadas a laboratório externo credenciado (Unesp - campus de Botucatu) para a determinação dos atributos químicos de fertilidade seguindo a metodologia proposta por Raij et al. (2001). Foram determinados os valores de pH, matéria orgânica (M.O.), acidez potencial ($H + Al$), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases ($V\%$), bem como os teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), alumínio trocável (Al^{3+}). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos limpos, devidamente identificados e vedados.

5.3 Processo de compostagem e caracterização do composto orgânico

5.3.1 Coleta e preparação do composto

Foram coletados 126 kg de composto orgânico, proveniente da compostagem de resíduos de incubatórios avícolas com adição de material estruturante (serragem), na empresa Bio Rossi Compostagem Ltda., localizada em Corumbataí – SP, no dia 17/01/2026. A amostra correspondia ao material que havia concluído a etapa de aeração forçada após 31 dias, em 16/01/2026, sendo posteriormente encaminhada à segunda fase do processo, na qual permaneceu disposta em formato de monte (Figura 11).

O procedimento de coleta iniciou-se com a raspagem superficial do monte, removendo aproximadamente 3 cm da camada externa do material, a fim de evitar possíveis interferências externas. Em seguida, procedeu-se à pesagem da quantidade necessária de composto para a condução do experimento.

Figura 11 - Processo de origem do composto orgânico na empresa fornecedora: a) resíduo de incubatório utilizado no processo de compostagem; b) leira com sistema de aeração forçada; c) monte selecionado para coleta do material



Fonte: Elaborada pela autora.

Após a coleta, o composto foi transportado para a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), sendo acondicionado no Centro de Estudos Ambientais (CEA), em local coberto e protegido de intempéries. No local de acondicionamento, realizou-se inicialmente a limpeza da superfície selecionada. Em seguida, foi posicionada uma lona, com o objetivo de evitar o contato do composto com o solo subjacente e facilitar o manuseio durante o monitoramento e o revolvimento. O material foi então disposto sobre a lona, formando uma leira com dimensões aproximadas de 1,2 m de comprimento, 0,7 m de largura e 0,35 m de altura (Figura 12).

Figura 12 - Formação da leira experimental para o processo de maturação do composto orgânico



Fonte: Elaborada pela autora.

5.3.2 Monitoramento e controle do processo

O processo de compostagem teve duração total de 80 dias, sendo os 31 dias iniciais conduzidos pela empresa em sistema de aeração forçada, seguidos por 49 dias de monitoramento e controle manual na Unesp, até a obtenção de um composto orgânico maturado. Durante esse período, foram realizados o monitoramento diário da temperatura, umidade e potencial hidrogeniônico (pH). As medições foram realizadas diariamente, em horário padronizado entre 12:00 horas e 15:00 horas, definido previamente com o objetivo de reduzir interferências decorrentes das variações climáticas ao longo do dia e garantir maior consistência nos dados obtidos.

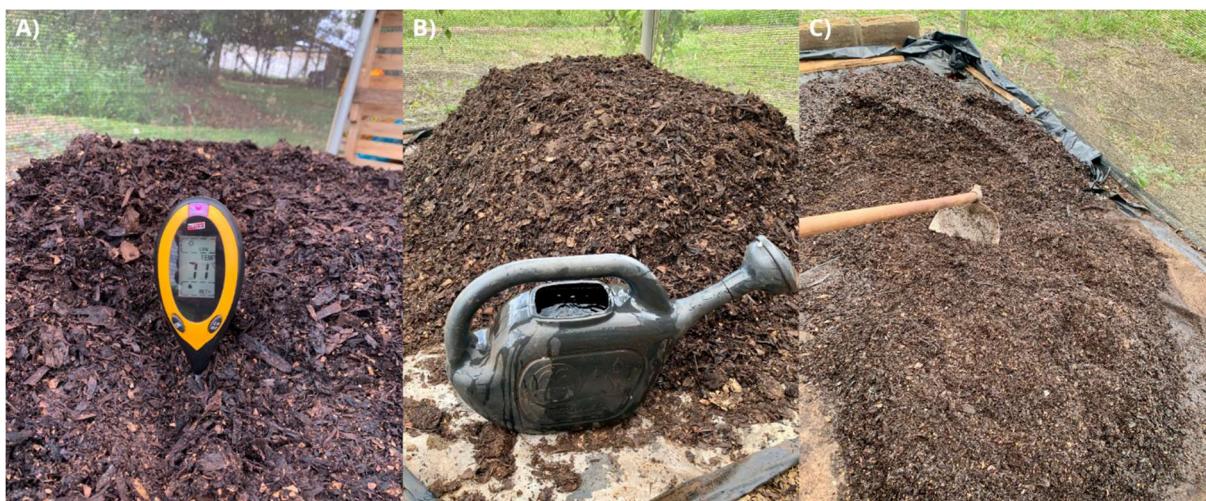
O monitoramento foi realizado com o auxílio de medidor eletrônico de solo 4 em 1 da marca Instrutherm, permitindo estimativas operacionais de temperatura, umidade e pH por meio da inserção de sonda metálica no material, com leitura digital imediata. Os parâmetros foram definidos de acordo com as instruções do fabricante (INSTRUTHERM, 2015).

A umidade do composto foi classificada em cinco níveis, associados a faixas aproximadas de umidade relativa: DRY+ (<20%, muito seco), DRY (30–40%, seco), NOR (40–65%, normal), WET (60–80%, úmido) e WET+ (>80%, muito úmido).

O pH foi monitorado em faixa de 4,5 a 8,0, permitindo acompanhar as variações químicas do material. A temperatura foi registrada em faixa operacional de 30 °C a 85 °C, possibilitando o acompanhamento da evolução térmica da compostagem.

Sempre que necessário, realizou-se a correção da umidade por meio da adição de água com regador de 5 litros, seguida de revolvimento manual da leira para promover a homogeneização do composto. Nos casos em que não se fazia necessária a adição de água, o material era deixado em repouso ou, eventualmente, revolvido. A necessidade de correção de umidade foi definida com base na classificação indicada pelo equipamento, sendo efetuada sempre que o composto apresentava condição DRY ou DRY+, visando manter condições adequadas ao desenvolvimento da atividade microbiológica. Já o revolvimento sem adição de água foi realizado quando o material apresentava condição WET+, favorecendo a aeração, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Monitoramento e controle do processo de compostagem: a) inserção da sonda metálica no composto para medição de temperatura, umidade e pH; b) correção da umidade com regador de 5 L; c) revolvimento manual da leira com enxada



Fonte: Elaborada pela autora.

Todos os parâmetros foram registrados em planilhas eletrônicas, permitindo o controle sistemático dos dados ao longo do período experimental. Paralelamente, foram acompanhadas as condições ambientais do local, incluindo temperatura ambiente e umidade relativa, obtidas por meio da estação meteorológica do campus, possibilitando a análise comparativa entre as

condições externas e o comportamento térmico do composto. Os registros completos encontram-se no Apêndice A.

5.3.3 Análises laboratoriais do composto orgânico

Após a estabilização do composto orgânico, foi coletada uma amostra representativa de 1 kg, peneirada em malha de 4 mm e acondicionada em saco plástico limpo conforme Figura 14.

Figura 14 - Amostra representativa de composto orgânico após peneiramento em malha de 4 mm



Fonte: Elaborada pela autora.

Considerando os 31 dias prévios de processamento na empresa e os 49 dias de monitoramento experimental, o composto totalizou 80 dias de compostagem. As análises laboratoriais do composto orgânico, ao final desse período, destinadas à sua caracterização físico-química, foram realizadas em laboratório externo credenciado (Laboratório de Fertilizantes e Corretivos – Unesp, campus de Botucatu). Essas análises compreenderam a determinação de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre) e micronutrientes (zinco, manganês, cobre, ferro, boro e sódio). Também foram avaliados parâmetros físico-químicos, incluindo matéria orgânica (M.O.), potencial hidrogeniônico (pH), carbono orgânico (C.O.) e Relação C/N.

As determinações de sólidos totais (ST), teor de umidade, sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) foram realizadas no Centro de Estudos Ambientais (CEA) da Unesp, conforme as diretrizes da American Public Health Association (APHA), método 2540G.

Para as análises de sólidos, foram utilizados cadinhos de cerâmica previamente lavados, secos e calcinados, balança analítica de precisão, estufa com controle de temperatura, mufla e dessecador. Antes do uso, os cadinhos foram submetidos à calcinação e posteriormente resfriados em dessecador até atingirem temperatura ambiente, a fim de garantir estabilidade de massa.

As análises foram realizadas em triplicata, utilizando aproximadamente 15 g de amostra para cada repetição. Para determinação do teor de umidade e dos sólidos totais, as amostras foram pesadas para obtenção da massa úmida e, em seguida, submetidas à secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. Após esse período, procedeu-se à pesagem, com retorno das amostras à estufa por mais 2 horas para verificação de massa constante. A diferença entre a massa úmida e a massa seca correspondeu ao teor de umidade, enquanto a massa remanescente após secagem representou os sólidos totais do material.

O teor de umidade foi calculado conforme a Equação (4):

$$H(\%) = \frac{(Mu - Ms)}{Mu} * 100 \quad (4)$$

onde:

H = teor de umidade (%);

Mu = massa úmida da amostra (g);

Ms = massa seca da amostra (g).

Os sólidos totais foram determinados conforme a Equação (5):

$$ST(\%) = \frac{Ms}{Mu} * 100 \quad (5)$$

onde:

ST = sólidos totais (%);

Ms = massa seca da amostra (g);

Mu = massa úmida da amostra (g).

Posteriormente, para determinação dos sólidos voláteis e sólidos fixos, as amostras secas foram submetidas à calcinação em forno mufla da marca Quimis, com elevação gradual da temperatura até atingir 550 °C, seguindo o programa automático do equipamento, com taxa aproximada de aquecimento de 10 °C por minuto e etapas intermediárias de estabilização. Após atingir a temperatura final de 550 °C, as amostras permaneceram em patamar térmico por 240 minutos, tempo necessário para promover a completa combustão da matéria orgânica presente na amostra.

Após a calcinação, os cadinhos foram resfriados em dessecador até temperatura ambiente e novamente pesados. A massa remanescente após a calcinação correspondeu aos sólidos fixos (fração mineral), enquanto a diferença entre a massa seca e a massa após a calcinação correspondeu aos sólidos voláteis, representativos da fração orgânica do composto.

Os sólidos fixos foram calculados conforme a Equação (6):

$$Tf(\%) = \frac{Mc}{Ms} * 100 \quad (6)$$

onde:

Tf = sólidos fixos (%);

Mc = massa remanescente após calcinação (g);

Ms = massa seca da amostra (g).

Os sólidos voláteis foram determinados conforme a Equação (7):

$$Tv(\%) = \frac{(Ms - Mc)}{Ms} * 100 \quad (7)$$

onde:

Tv = sólidos voláteis (%);

Ms = massa seca da amostra (g);

Mc = massa remanescente após calcinação (g);

Os resultados foram expressos em porcentagem, sendo os dados completos apresentados no Apêndice B.

5.4 Delineamento Experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por 4 tratamentos realizados em triplicata, totalizando 12 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram na aplicação isolada e combinada de composto orgânico e fertilizante mineral NPK (04-14-08), além de um tratamento controle (solo sem adubação). A descrição detalhada dos tratamentos e respectivas doses está apresentada no Quadro 1. As doses foram expressas em base seca.

Quadro 1 - Descrição dos tratamentos experimentais

Tratamentos	Descrição	Solo (kg vaso ⁻¹)	Composto (g vaso ⁻¹)	NPK (g vaso ⁻¹)
T1	Solo (sem adubação)	27,710	0	0
T2	Solo + Composto Orgânico	27,156	554	0
T3	Solo + 100% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	27,017	0	6,93
T4	Solo + Composto Orgânico + 50% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	26,809	554	3,47

Fonte: Elaborada pela autora.

A dose de composto orgânico aplicada foi de 40 t/ha, conforme recomendações do Boletim 100 do Estado de São Paulo, elaborado pelo Instituto Agrônomo (2022), que indica aplicação de 30 a 50 t/ha para adubação orgânica em área total. Utilizou-se dose intermediária, por representar condição média dentro da faixa recomendada.

O fertilizante mineral utilizado foi o NPK 04-14-08, aplicado na dose de 500 kg/ha, com base em estudo que demonstrou resultados satisfatórios para a cultura do milho, quando comparado à adubação orgânica (GOMES et al., 2005). No tratamento combinado (T4), foi utilizada redução de 50% da dose recomendada de NPK, correspondendo a 250 kg/ha, associada à aplicação de composto orgânico na mesma dose empregada no tratamento T2, correspondente a 40 t/ha.

As doses utilizadas foram obtidas a partir de recomendações agronômicas de campo e convertidas para escala de vasos, conforme descrito no item 5.5.

As quantidades de nutrientes apresentadas na Tabela 1 referem-se exclusivamente aos nutrientes fornecidos pelos insumos aplicados em cada tratamento, com base na composição química do composto orgânico (base seca) e do fertilizante mineral NPK 04-14-08 (4% de N, 14% de P₂O₅ e 8% de K₂O). Os valores correspondem ao total de nutrientes aportados por vaso, provenientes do composto orgânico (T2), do fertilizante mineral (T3) e da combinação de

ambos (T4), enquanto o tratamento controle (T1) não apresenta aporte de nutrientes por insumos.

Tabela 1 - Nutrientes totais fornecidos pelos insumos em cada tratamento

Nutriente	Unidade	T1	T2	T3	T4
N	g vaso ⁻¹	0	7,2000	0,2770	7,3390
P ₂ O ₅	g vaso ⁻¹	0	3,9900	0,9700	4,4760
K ₂ O	g vaso ⁻¹	0	1,2200	0,5540	1,4980
Ca	g vaso ⁻¹	0	64,5400	0,0000	64,5400
Mg	g vaso ⁻¹	0	1,2200	0,0000	1,2200
S	g vaso ⁻¹	0	0,5000	0,0000	0,5000
Na	g vaso ⁻¹	0	1,1390	0,0000	1,1390
B	g vaso ⁻¹	0	0,0127	0,0000	0,0127
Cu	g vaso ⁻¹	0	0,0055	0,0000	0,0055
Fe	g vaso ⁻¹	0	0,6270	0,0000	0,6270

Fonte: Elaborada pela autora.

5.5 Cálculo e padronização das doses em escala de vasos

Para que a aplicação de insumos em vasos fosse comparável às recomendações utilizadas em campo, foi necessário que as quantidades aplicadas respeitassem a proporção entre o volume do vaso e a massa de solo correspondente à camada arável (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002; RAIJ et al., 2001). Assim, a definição das doses não se baseou apenas na recomendação por hectare, mas também na quantidade de solo presente em cada vaso, garantindo que os efeitos dos insumos sobre o solo e as plantas fossem simulados de forma realista e mensurável.

No presente estudo, foram utilizados vasos com volume nominal de 25 L, adotando-se um volume operacional de 20 L por vaso, mantendo uma borda livre para facilitar a irrigação e o manejo. Para padronizar a aplicação de adubação, cada vaso recebeu marcações visuais correspondentes a volumes de 5, 10, 15, 20 e 25 L, permitindo monitorar e aplicar o solo e os insumos de forma precisa, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Padronização de volumes em vaso experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

A escolha do volume operacional busca simular o preenchimento da camada arável de campo, garantindo homogeneidade na aplicação dos insumos e evitando efeitos de transbordamento ou compactação excessiva.

A massa de solo por vaso foi calculada com base na densidade aparente seca do solo, obtida em campo, permitindo converter o volume do vaso em massa de solo, conforme metodologia da EMBRAPA (2017). A massa de solo seco (M_s) foi obtida pela Equação (8):

$$M_s = D_s \times V \quad (8)$$

onde:

M_s = massa de solo seco (g);

D_s = densidade aparente seca do solo (g cm^{-3});

V = volume operacional do vaso (cm^3).

Para converter a massa de solo seco para úmida, utilizou-se o teor de umidade gravimétrica do solo, determinado por secagem em estufa a 105 °C até massa constante (EMBRAPA, 2017). A massa de solo úmido (M_u) foi calculada pela Equação (9):

$$Mu = Ms \times (1 + U) \quad (9)$$

onde:

Mu = massa de solo úmido (g);

Ms = massa de solo seco (g);

U = teor de umidade (kg/kg).

Para garantir uniformidade física entre os vasos, a densidade de enchimento foi mantida o mais próxima possível da densidade aparente do solo em campo, evitando variações não controladas que poderiam influenciar a disponibilidade de água, nutrientes e o desenvolvimento radicular.

A densidade do solo, determinada pelo método do anel volumétrico, apresentou valor de $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ na condição de campo, estando dentro da faixa esperada para solos arenosos, que, segundo Araújo et al. (2004), varia entre 1,35 e $1,85 \text{ g cm}^{-3}$. No entanto, considerando a necessidade de adequação às condições experimentais em vasos, foi adotada densidade de $1,39 \text{ g cm}^{-3}$, a fim de garantir melhor padronização e manejo do sistema, conforme detalhado nos cálculos apresentados no Apêndice C.

As doses dos insumos (composto orgânico de resíduos de incubatórios avícolas e fertilizante mineral NPK 04-14-08) foram convertidas de campo para vaso pelo método de equivalência de massa de solo do tipo *furrow slice* (IMAKUMBILI, 2019), que permite ajustar a dose proporcionalmente à massa de solo contida em cada vaso, considerando a camada arável de 15–20 cm. A camada arável foi estimada em 2.000.000 kg de solo por hectare, valor adotado para simular as condições de campo e manter relevância agrônômica. A dose de insumo seco a ser aplicada em cada vaso foi calculada conforme a Equação 10:

$$M_{insumo,seco} = \left(\frac{Dose(kg/ha)}{2.000.000 \text{ kg solo/ha}} \right) \times Ms \quad (10)$$

onde:

Ms = massa de solo seco (Kg).

De forma análoga, a dose de composto orgânico calculada em massa seca também foi convertida para massa úmida, utilizando-se o teor de umidade do material, garantindo aplicação

homogênea nos vasos. Dessa forma, cada vaso recebeu a quantidade proporcional de insumo equivalente à dose recomendada em campo.

5.6 Condução do experimento

As unidades experimentais foram constituídas por vasos de plástico reciclado, com capacidade de 25 L, 34 cm de diâmetro na borda superior, 28 cm na base inferior e 35 cm de altura. Cada vaso foi preenchido com solo previamente caracterizado, peneirado em malha de 4 mm para garantir maior homogeneidade do material. O composto orgânico utilizado nos tratamentos também foi peneirado na mesma malha. De acordo com o tratamento experimental, foram adicionados ao solo composto orgânico e/ou fertilizante mineral (NPK). A montagem das unidades experimentais, bem como o processo de peneiramento do solo e do composto orgânico, pode ser observada nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Montagem do experimento



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 17 - Peneiramento do solo e composto orgânico: a) composto orgânico retido na peneira; b) composto orgânico peneirado; c) solo retido na peneira; d) solo peneirado



Fonte: Elaborada pela autora.

Os vasos foram posicionados no interior da estufa de cultivo, com espaçamento de 0,45 m entre si, sobre suportes elevados, assegurando circulação de ar adequada, minimizando sombreamento e efeitos de bordadura. Cada unidade apresentou furos de drenagem cobertos com tecido de poliéster de malha 200 *mesh*, evitando a perda de partículas do substrato (Figura 18).

Figura 18 - Fundo do vaso com malha de poliéster (200 *mesh*) para retenção de partículas

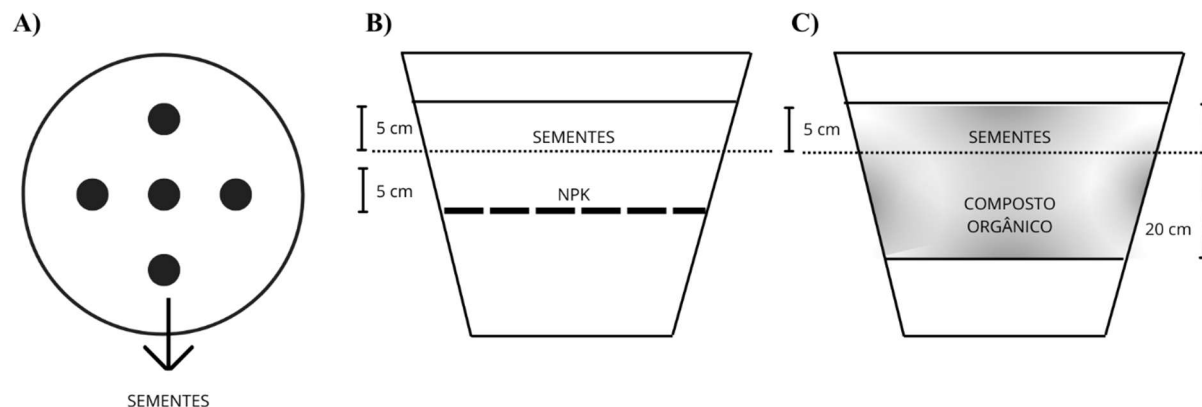


Fonte: Elaborada pela autora.

Para a semeadura, realizada em 13/03/2026, foram utilizadas cinco sementes de milho híbrido Ipanema precoce por vaso, distribuídas de forma uniforme, conforme recomendação da EMBRAPA (2015), e depositadas a 5 cm de profundidade em relação à superfície do solo, conforme ilustrado na Figura 19. Aos 7 dias após a emergência (DAE), em 24/03/2026, realizou-se o desbaste, mantendo apenas uma planta por vaso, de forma a garantir uniformidade no crescimento. Nos vasos que receberam fertilização mineral com NPK, o fertilizante foi aplicado 5 cm abaixo das sementes.

Todos os procedimentos foram padronizados entre os tratamentos, assegurando condições uniformes de cultivo e permitindo comparações consistentes dos resultados.

Figura 19 - Esquema representativo da semeadura e aplicação de fertilizantes nos vasos: a) distribuição das sementes; b) profundidade da semeadura e posicionamento do NPK; c) profundidade da semeadura e aplicação do composto orgânico



Fonte: Elaborada pela autora.

Durante o período experimental, a temperatura do ar e a umidade relativa foram acompanhadas diariamente às 14 horas, com base nos dados registrados pela estação meteorológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA), situada no campus, permitindo o monitoramento padronizado das condições climáticas locais ao longo do experimento.

Nos vasos experimentais, a umidade do solo também foi controlada no mesmo horário, utilizando um medidor digital *6-in-1 Intelligent Soil Tester*, garantindo controle operacional e uniformidade entre os tratamentos.

A irrigação foi realizada manualmente com regador, aplicando-se volumes uniformes de água em todos os tratamentos, de forma a manter a umidade do solo entre 50 e 60% da capacidade de campo, adotado como critério de manejo hídrico do experimento.

5.7 Variáveis avaliadas

5.7.1 Crescimento e desenvolvimento da planta

A altura das plantas e o número de folhas foram avaliados quinzenalmente durante o período de crescimento vegetativo e ao final do experimento, até o estágio V8. Nessa fase, ocorre elevada absorção de nutrientes e definição de componentes do rendimento da cultura (EMBRAPA, 2010).

A altura foi medida do colo até a extremidade da última folha completamente expandida, utilizando régua graduada em centímetros e acompanhando a curvatura da lâmina foliar. O número de folhas consideradas para a contagem incluiu apenas lâminas totalmente desenvolvidas, desconsiderando folhas ainda em expansão, sendo o resultado utilizado para a determinação do estágio fenológico vegetativo da cultura. Para cada tratamento, foi calculada a média dos valores obtidos, sendo os resultados posteriormente arredondados para números inteiros.

Ao final do experimento, foi determinado o diâmetro do colmo, medido na região basal das plantas com auxílio de paquímetro, sendo os resultados expressos em milímetros.

Para determinação da massa seca, folhas, colmos e raízes foram coletados, limpos de impurezas visíveis e secos em estufa (modelo ESTF-6120-0062) a 65 °C até atingirem peso constante. Posteriormente, as amostras foram pesadas em balança analítica, sendo determinada a massa seca de cada compartimento vegetal.

5.7.2 Propriedades físicas do solo após os tratamentos

Ao final do período experimental, foram realizadas análises físicas do solo, adotando-se a mesma metodologia descrita no item 5.2.2. As amostras foram coletadas ao término do experimento, em cada unidade experimental, devidamente identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Geotécnica para determinação dos atributos físicos do solo, sendo avaliados: densidade, porosidade, ensaio de desagregação (*Slaking Test*), ensaio de dispersão (*Crumb Test*) e Índice de Estabilidade de Agregados (IEA).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização do solo

De acordo com Locatelli et al. (2024), o solo da área de estudo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, informação corroborada pelo mapa pedológico do Brasil disponibilizado pelo IBGE (2018). Com base nessas fontes, o solo é descrito como de textura média arenosa.

A umidade gravimétrica do solo foi de 11,69%, refletindo baixa retenção hídrica, característica típica de solos com maior fração arenosa (BRADY & WEIL, 2013). Já a porosidade total do solo foi de 42,23%, sendo esse valor compatível com a faixa indicada por Bruand et al. (2005) para solos de textura arenosa, cuja porosidade varia entre 0,33 e 0,60 m³.m³. Os cálculos detalhados desses parâmetros encontram-se apresentados no Apêndice D.

No que se refere à estabilidade estrutural, os resultados dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 2 e 3, os quais fundamentam a avaliação dos efeitos dos tratamentos.

Tabela 2 - Parâmetros e classificação dos ensaios de *Slaking Test* e *Crumb Test*

Tempo de saturação (s)	Tempo de início da fissuração (s)	Tempo de desagregação total/parcial (s)	Classificação (<i>Slaking Test</i>)	Grau (<i>Crumb Test</i>)
13	16	21	Fraturamento	3

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 3 - Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) do solo

Abertura da malha (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)
2	11,19	46,07
1,19	1,94	7,99
0,5	8,15	33,55
0,25	2,18	8,97
<0,25	0,83	3,42
Total da amostra	24,29	100
Agregados > 0,25	23,46	96,58
IEA	-	96,58

Fonte: Elaborada pela autora.

No *Slaking Test*, observou-se tempo de saturação de 13 segundos, início da fissuração aos 16 segundos e desagregação aos 21 segundos, com classificação final do solo como fraturamento. Os resultados indicaram a quebra da amostra em fragmentos que mantêm as faces externas. Esse processo está associado principalmente à rápida entrada de água nos agregados

e à expulsão/compressão do ar aprisionado nos poros, gerando tensões internas que levam à ruptura. Assim, a desagregação ocorre predominantemente por mecanismos físicos, indicando suscetibilidade à instabilidade estrutural sob umedecimento rápido (HOLMGREN; FLANAGAN, 1977). O *Crumb Test* apresentou grau 3 (reação moderada), evidenciando turbidez acompanhada de fina deposição de partículas no fundo do recipiente, indicando comportamento intermediário quanto à dispersão em água. O índice de estabilidade de agregados (IEA) foi de 96,58%, indicando elevada estabilidade estrutural sob condições de peneiramento, com predominância de agregados resistentes à desagregação ($>0,25$ mm), conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Solo retido nas malhas - IEA



Fonte: Elaborada pela autora.

Complementarmente à caracterização física e estrutural do solo, foram determinados seus atributos químicos, os quais são fundamentais para a avaliação da fertilidade. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização química do solo

Parâmetro	Unidade	Valor
pH (CaCl ₂)	-	4,0
M.O.	g/dm ³	16
P (resina)	mg/dm ³	19
Al ³⁺	mmolc/dm ³	14
H+Al	mmolc/dm ³	54
K	mmolc/dm ³	0,9
Ca	mmolc/dm ³	6
Mg	mmolc/dm ³	2
SB	mmolc/dm ³	9
CTC	mmolc/dm ³	63
V	%	14
S	mg/dm ³	5
B	mg/dm ³	0,28
Cu	mg/dm ³	1,4
Fe	mg/dm ³	103
Mn	mg/dm ³	1,2
Zn	mg/dm ³	1,3

Fonte: Elaborada pela autora.

A análise química evidenciou condições de elevada acidez e baixa saturação por bases. O pH em CaCl₂ (4,0) enquadra-se na classe de acidez muito alta, sendo coerente com os elevados teores de alumínio trocável (Al³⁺ = 14 mmolc dm⁻³) e de acidez potencial (H+Al = 54 mmolc dm⁻³), indicando elevada ocupação dos sítios de troca por H⁺ e Al³⁺. A soma de bases (SB = 9 mmolc dm⁻³), em relação à capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC = 63 mmolc dm⁻³), resultou em baixa saturação por bases (V = 14%), caracterizando o solo como distrófico, conforme os critérios de interpretação da fertilidade do solo propostos por Raij et al. (2001).

Em relação aos nutrientes, o fósforo disponível (P = 19 mg dm⁻³), determinado pelo método da resina, foi classificado como médio. O potássio (K = 0,9 mmolc dm⁻³) apresentou teor baixo, enquanto o cálcio (Ca = 6 mmolc dm⁻³) apresentou teor médio, e o magnésio (Mg = 2 mmolc dm⁻³), teor baixo, conforme os critérios de interpretação da fertilidade do solo. A matéria orgânica (16 g dm⁻³) indicou teor moderado. O enxofre (S = 5 mg dm⁻³) apresentou teor médio. Entre os micronutrientes, observaram-se teores médios de boro, elevados de cobre, ferro e zinco, e baixos de manganês, de acordo com Raij et al. (2001).

De forma integrada, os atributos químicos indicam um ambiente ácido e com baixa saturação por bases, condições que restringem a disponibilidade de nutrientes e comprometem o desenvolvimento radicular das plantas. Essas limitações químicas são características de solos altamente intemperizados e podem reduzir a eficiência de absorção de nutrientes pela cultura do milho, refletindo em limitações ao crescimento e ao desempenho produtivo (RAIJ, 2011;

EMBRAPA, 2017). Essas condições reforçam a relevância da avaliação dos diferentes manejos de adubação aplicados no presente estudo, considerando o potencial de resposta da cultura do milho em solos de baixa fertilidade.

6.2 Dinâmica do processo de compostagem

6.2.1 Temperatura da leira

O monitoramento da temperatura teve início no trigésimo segundo dia do processo de compostagem, sendo realizado ao longo de 49 dias consecutivos, após 31 dias iniciais em sistema de aeração forçada na empresa. O processo de compostagem totalizou 80 dias de duração. O objetivo foi analisar a dinâmica térmica do processo, cuja evolução da temperatura da leira evidenciou as fases termofílica e mesofílica.

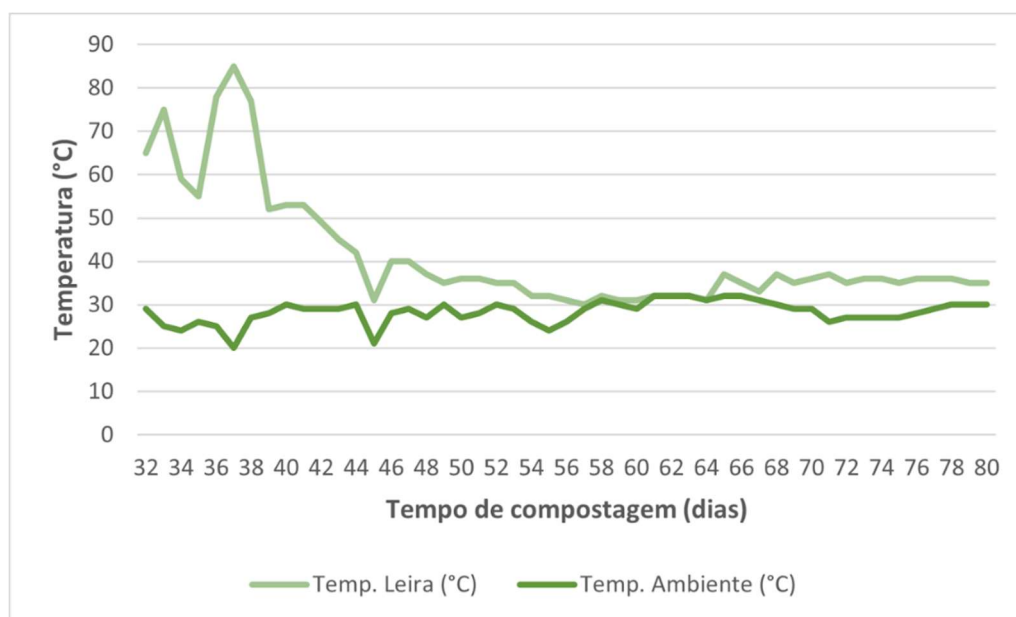
Durante a fase termofílica (dias 32–38), a temperatura elevou-se progressivamente, atingindo pico de 85 °C no dia 37, acima da faixa considerada ideal (55–65 °C) para compostagem aeróbia. Temperaturas elevadas podem comprometer a diversidade microbiana e intensificar perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (KIEHL, 2004; BERNAL et al., 2009). Esse comportamento reflete elevada atividade microbiana associada à degradação de matéria orgânica facilmente biodegradável, podendo também estar relacionado a limitações na aeração ou no revolvimento da leira.

A partir do dia 39, observou-se redução gradual da temperatura (31–52 °C), indicando o consumo da fração orgânica mais lábil e o início da fase mesofílica (BERTOLDI et al., 1983). Entre os dias 46 e 60, os valores variaram entre 30–40 °C, aproximando-se da temperatura ambiente e marcando a transição para a fase mesofílica de estabilização, na qual ocorre a decomposição de compostos mais complexos e o início da formação de substâncias húmicas (TUOMELA et al., 2000).

Nos dias finais (60–80), a temperatura manteve-se relativamente estável (30–37 °C), próxima à temperatura ambiente, evidenciando a redução da atividade microbiana e o avanço da estabilização da matéria orgânica, característicos da fase de maturação (KIEHL, 2004; BERNAL et al., 2009).

A variação da temperatura da leira e da temperatura ambiente durante o monitoramento pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Variação da temperatura da leira e da temperatura ambiente durante o processo de compostagem

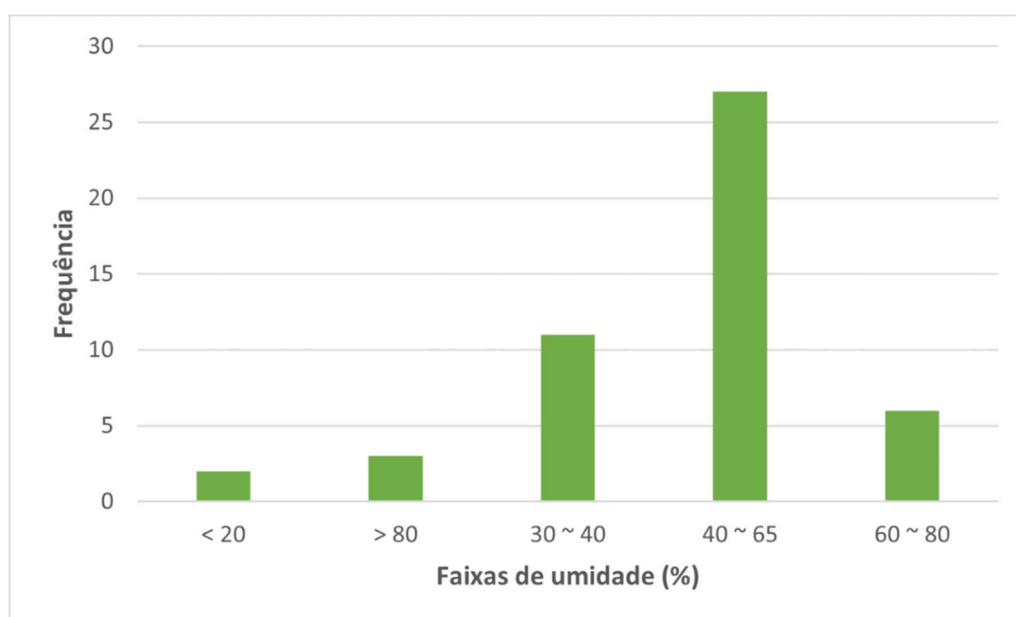


Fonte: Elaborada pela autora.

6.2.2 Umidade da leira

A umidade da leira apresentou variações ao longo do período de monitoramento, sendo registrada em faixas percentuais estimadas (<20%, 30–40%, 40–65%, 60–80% e >80%). A frequência das classes de umidade observadas está apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Frequência das classes de umidade da leira durante o monitoramento



Fonte: Elaborada pela autora.

Observou-se predominância da faixa de 40–65%, considerada adequada para compostagem aeróbia, por manter o equilíbrio entre disponibilidade hídrica para a atividade microbiana e a porosidade do material (KIEHL, 2004; VALENTE et al., 2009).

Nos primeiros dias de monitoramento (32–35), foram registrados valores inferiores a 40%, indicando condição inicial de limitação hídrica, potencialmente restritiva à atividade microbiológica, uma vez que a água é essencial para o transporte de nutrientes e para as reações bioquímicas envolvidas na degradação da matéria orgânica (KIM et al., 2003).

Ao longo do período experimental, a predominância da faixa de 40–65% indica que o sistema foi mantido, na maior parte do tempo, em condições favoráveis ao desenvolvimento microbiano e à eficiência do processo de compostagem. Registros pontuais de umidade entre 30–40% sugerem episódios de perda hídrica, possivelmente associados à intensificação da atividade biológica e à evaporação durante a fase termofílica.

Por outro lado, valores superiores a 60% estiveram associados, principalmente, às intervenções de manejo, como a adição de água. Embora teores elevados possam reduzir temporariamente a difusão de oxigênio (RICHARD et al., 2002), o revolvimento periódico da leira contribuiu para a reestruturação da porosidade, evitando condições anaeróbias.

A dinâmica da umidade também refletiu a influência das condições climáticas, especialmente da umidade relativa do ar (39–97%), em que períodos mais secos favoreceram a evaporação, enquanto condições mais úmidas contribuíram para a retenção de água no material, comportamento consistente com o descrito por (HAUG, 1993).

Na etapa final do processo, a umidade apresentou tendência de estabilização em faixas intermediárias (30–65%), indicando redução da atividade microbiana e maior grau de estabilidade do composto.

6.2.3 pH da leira

O pH da leira variou ao longo do processo de compostagem, refletindo as transformações físico-químicas e microbiológicas associadas à decomposição da matéria orgânica. No primeiro dia de monitoramento, correspondente ao 32º dia do processo de compostagem, registrou-se pH próximo à neutralidade (7,0), sob condições de baixo teor de umidade, o que pode indicar atividade microbiana já estabelecida, porém parcialmente limitada pela disponibilidade hídrica (LIANG & MCCLENDON, 2003; VALENTE et al., 2009).

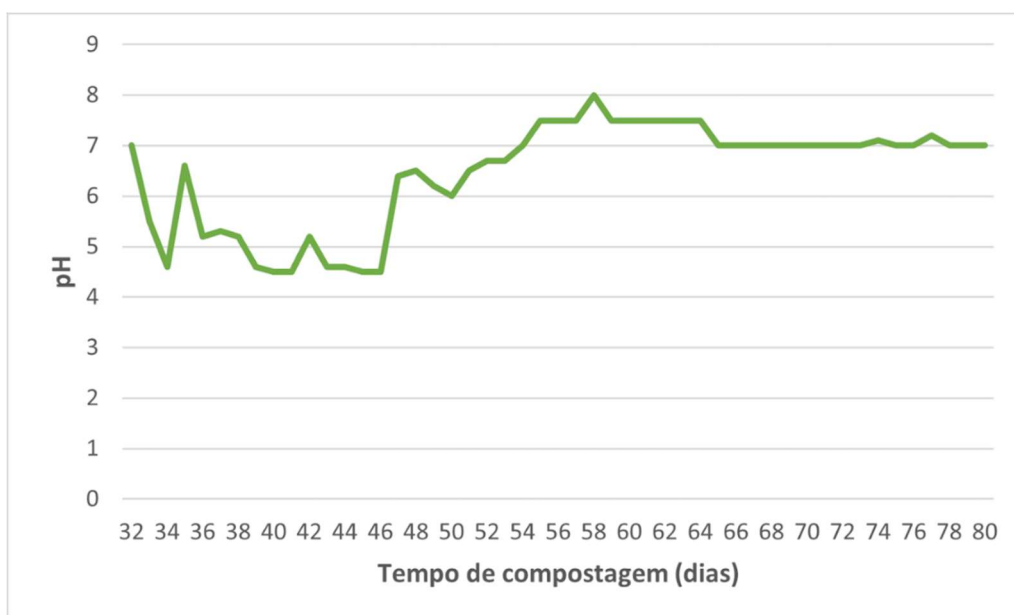
Após a adição de água à leira, observou-se redução do pH para valores entre 4,2 e 4,7, caracterizando a fase de acidificação típica da degradação de compostos orgânicos facilmente assimiláveis e da formação de ácidos orgânicos de cadeia curta (KIEHL, 2004; VALENTE et al., 2009; TUOMELA et al., 2000). A manutenção dessa faixa ácida por determinado período indica predominância de microrganismos atuantes na decomposição das frações mais lábeis da matéria orgânica.

A partir de aproximadamente 50 dias, verificou-se elevação gradual do pH para valores próximos à neutralidade (6,7), seguida de estabilização em faixa levemente alcalina (7,2–7,9) nas etapas finais. Esse comportamento está associado à metabolização dos ácidos previamente acumulados e à intensificação dos processos de amonificação, característicos das fases de estabilização e maturação do composto (KIEHL, 2004; VALENTE et al., 2009).

Os valores finais de pH encontram-se dentro da faixa considerada adequada para aplicação agrícola (7,0–8,0), indicando que o material atingiu bom grau de estabilidade química (KIEHL, 1985; KIEHL, 2004).

A variação dos valores de pH ao longo do período de compostagem pode ser observada na Figura 23, que apresenta a evolução desse parâmetro durante o monitoramento do processo.

Figura 23 – Variação do pH ao longo do processo de compostagem



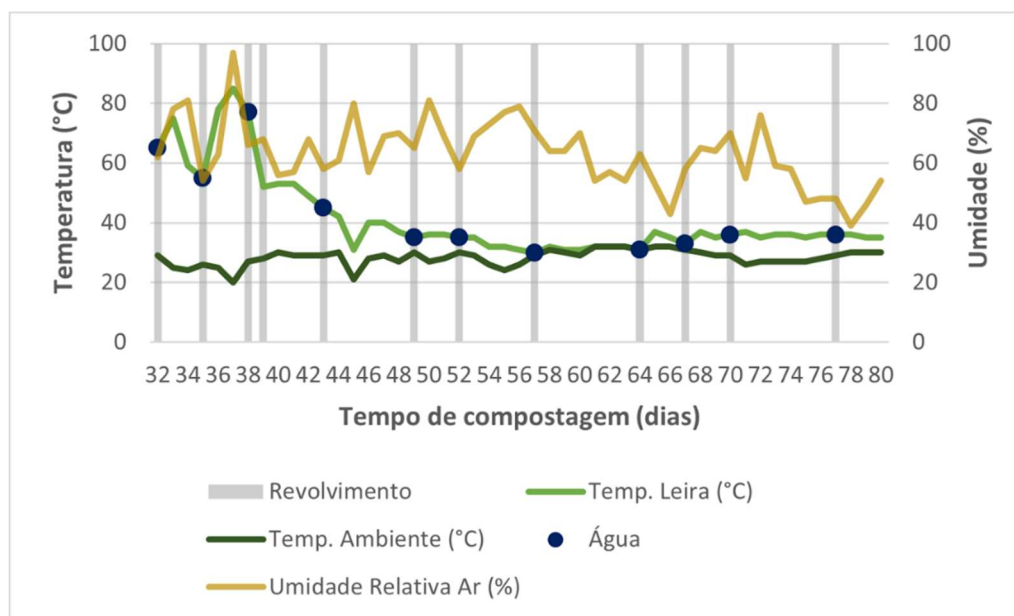
Fonte: Elaborada pela autora.

6.2.4 Observações operacionais e características do processo

Entre os dias 32 e 80, as intervenções operacionais, especialmente revolvimentos e adições de água, influenciaram diretamente a dinâmica do processo, promovendo respostas

rápidas nos parâmetros de temperatura, umidade e pH (itens 6.2.1 – 6.2.3). A distribuição dessas intervenções ao longo do período de monitoramento está apresentada na Figura 24, enquanto os volumes de água aplicados encontram-se detalhados na Tabela 5.

Figura 24 – Intervenções operacionais realizadas durante o processo de compostagem



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5 - Volume de água adicionado durante as intervenções de umidificação da leira

Tempo de compostagem (dias)	Volume de água aplicado (L)
32	15
35	55
38	50
43	5
49	15
52	15
57	15
64	15
67	5
70	5
77	5

Fonte: Elaborada pela autora.

Observou-se que, após as intervenções, ocorria redução temporária da temperatura, seguida de rápida elevação nos dias subsequentes, indicando que o revolvimento restabeleceu a aeração e favoreceu a retomada da atividade microbiana. Esse comportamento sugere que, além de promover oxigenação, o manejo contribuiu para a reorganização das condições físico-

químicas do material, intensificando a atividade metabólica. Ao longo do período avaliado de 49 dias, foram aplicados, ao todo, 200 L de água, evidenciando a importância do controle da umidade para a manutenção da atividade microbiana e da dinâmica do processo de compostagem.

A dinâmica hídrica mostrou elevada sensibilidade ao manejo. Aplicações de maior volume, como nos dias 35 (55 L) e 38 (50 L), resultaram em alterações abruptas no teor de umidade. Ainda assim, tais variações não comprometeram a continuidade do processo, indicando relativa tolerância operacional da leira.

Um evento relevante foi observado no dia 33, quando a ausência de revolvimento, associada a condições de elevada temperatura e pH ácido, resultou em emissão de odores e presença de vetores, indicando acúmulo temporário de metabólitos intermediários da decomposição. A rápida mitigação após o revolvimento subsequente reforça a importância do manejo na manutenção das condições aeróbias do sistema (KIEHL, 2004).

As condições climáticas atuaram como fator modulador secundário, influenciando principalmente a dinâmica da umidade. Períodos mais secos aumentaram a necessidade de intervenções, enquanto condições mais úmidas favoreceram a retenção de água no material.

Nas etapas finais (dias 60–80), observou-se redução na frequência de intervenções e maior estabilidade operacional, acompanhada por características típicas de maturação, como coloração escura homogênea e odor semelhante ao de terra, associadas à estabilização da matéria orgânica e formação de substâncias húmicas (BERNAL et al., 2009; TUOMELA et al., 2000).

6.3 Caracterização do composto orgânico

Os resultados da caracterização química do composto orgânico produzido a partir de resíduos de incubatório são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise química do composto orgânico

Parâmetro	Unidade	Valor
N	%	1,3
P ₂ O ₅	%	0,72
K ₂ O	%	0,22
Ca	%	11,65
Mg	%	0,22
S	%	0,09
M.O.	% (base seca)	41
C.O.	% (base seca)	31
Na	mg kg ⁻¹	2056
B	mg kg ⁻¹	23
Cu	mg kg ⁻¹	10
Fe	mg kg ⁻¹	1132
Mn	mg kg ⁻¹	22
Zn	mg kg ⁻¹	44
Relação C/N	-	18:01
pH	-	6,6

Fonte: Elaborada pela autora.

O material apresentou composição química compatível com compostos orgânicos estabilizados de origem agroindustrial, contendo macro e micronutrientes relevantes ao uso agrônomo, conforme descrito por Adhikari et al. (2011). Os teores de nitrogênio (1,30%), fósforo (0,72% de P₂O₅) e potássio (0,22% de K₂O) indicam potencial para o fornecimento gradual de nutrientes ao solo, enquanto o elevado teor de matéria orgânica (41%) contribui para retenção de água e para a atividade microbiológica do solo (KIEHL, 2004).

Entre os macronutrientes avaliados, o cálcio constituiu o principal diferencial químico do material, apresentando concentração de 11,65%. Esse resultado está associado à elevada participação de cascas de ovos na composição do resíduo de incubatório, uma vez que esse material apresenta predominância de carbonato de cálcio em sua constituição (ORRICO et al., 2020). Além da contribuição nutricional, os elevados teores de cálcio, na forma de CaCO₃, contribuem para a neutralização da acidez do solo, promovendo melhorias nas condições químicas do meio (BUGATTI, 2016). Como reflexo dessa composição mineral, o composto apresentou pH 6,6, valor compatível com a faixa considerada adequada para fertilizantes orgânicos estabilizados (BERNAL et al. (2009).

Os micronutrientes Fe (1132 mg kg⁻¹), Zn (44 mg kg⁻¹), Mn (22 mg kg⁻¹) e Cu (10 mg kg⁻¹) ocorreram em concentrações agronomicamente relevantes, ampliando o potencial nutricional do material. Além disso, o teor de sódio determinado no composto foi de 2056 mg

kg⁻¹. Esse valor pode estar associado à presença de ovos não eclodidos e tecidos embrionários nos resíduos de incubatório, uma vez que o sódio integra naturalmente a composição mineral do ovo, concentrando-se principalmente na clara e, em menor proporção, na gema (STADELMAN; COTTERILL, 1995; ROMANOFF; ROMANOFF, 1949). Em termos agronômicos, esse teor pode contribuir para o aumento da salinidade do solo, visto que elevadas concentrações de sais reduzem a disponibilidade de água e nutrientes, limitando o desenvolvimento vegetal e, em situações mais severas, comprometendo a conclusão do ciclo de vida das plantas. Além disso, a salinização do solo afeta negativamente a germinação de sementes e o crescimento inicial de plântulas (SARAIVA FILHO; BONILLA, 2022).

Em comparação aos compostos produzidos a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de esgoto avaliados por Alves (2026), o material proveniente de resíduos de incubatório apresentou composição química distinta, caracterizada principalmente pelos maiores conteúdos de cálcio, nitrogênio e matéria orgânica. O teor de nitrogênio total (1,30%) foi superior ao observado no composto de lodo de esgoto (0,81%) e semelhante ao verificado no composto de RSU (1,27%), indicando elevado potencial para fornecimento desse nutriente. De forma semelhante, o conteúdo de matéria orgânica (41%) superou os valores reportados para RSU (28%) e lodo de esgoto (25%), condição relevante para melhoria do solo e estímulo à atividade microbiológica (ALVES, 2026; KIEHL, 2004).

O cálcio representou o principal diferencial entre os materiais comparados, apresentando concentração substancialmente superior aos compostos de RSU (0,94%) e lodo de esgoto (1,82%) descritos por Alves (2026). Esse resultado reforça a influência da composição do resíduo de incubatório sobre as características químicas do produto final, especialmente em função da presença de cascas de ovos. Embora os teores de fósforo e potássio tenham sido inferiores aos observados nos materiais comparados, os valores obtidos permanecem compatíveis com o aproveitamento agrícola do composto.

Além da composição química, a estabilidade do composto orgânico maturado foi avaliada por meio dos teores de umidade e das frações de sólidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Teor de umidade e frações de sólidos do composto orgânico maturado

Parâmetro	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média
Teor de umidade (%)	31,91	30,49	31,79	31,40
Sólidos totais (%)	68,09	69,51	68,21	68,60
Sólidos fixos (%)	35,79	39,33	36,44	37,19
Sólidos voláteis (%)	32,30	30,17	31,78	31,42

Fonte: Elaborada pela autora.

O composto apresentou teor de umidade de 31,40%. Conforme a Instrução Normativa nº 61/2020 do MAPA, fertilizantes orgânicos destinados à comercialização não devem exceder 50% de umidade. Valores muito baixos podem comprometer a estabilização microbiana: Bernal et al. (2009) sugerem faixa ideal entre 35% e 45%, enquanto WRAP (2014) recomenda 35%-40%. O padrão HKORC (2021) estabelece 25%-45% como intervalo adequado para compostos maturados, e Sayara et al. (2020) destacam que a redução da umidade após a fase ativa favorece estabilidade, armazenamento e comercialização. Assim, o valor obtido indica que o material alcançou estabilidade suficiente para armazenamento e uso.

O teor médio de sólidos totais (ST) foi de 68,60%, indicando uma baixa fração de umidade ao final do processo de compostagem. A fração de sólidos voláteis (SV) foi de 31,42%, evidenciando a presença de matéria orgânica ainda passível de degradação. De acordo com Sbizzaro (2013), a redução dos sólidos voláteis ao longo do processo é um dos principais indicadores da eficiência da compostagem e do grau de estabilização do material. Assim, os valores obtidos sugerem que o composto apresenta frações orgânicas remanescentes, associadas principalmente a materiais de decomposição mais lenta.

Os sólidos fixos (SF) corresponderam a 37,19%, representando a fração inorgânica do material. Conforme Inácio e Miller (2009), durante a compostagem ocorre a degradação da matéria orgânica, resultando na redução dos sólidos voláteis e no aumento relativo da fração mineral. Os resultados observados podem ser explicados pela composição dos resíduos utilizados, especialmente a presença de casca de ovo e serragem. A casca de ovo, por apresentar elevado teor mineral e baixo conteúdo orgânico, contribui para o aumento da fração de sólidos fixos (MAGALHÃES et al., 2011). Por outro lado, a serragem, rica em carbono e de difícil degradação, atua como substrato para a atividade microbiana, porém apresenta decomposição mais lenta (MARAGNO et al., 2006). Dessa forma, a natureza fibrosa e mineral dos resíduos de incubatório justifica os valores observados de ST e SF, bem como a permanência de sólidos

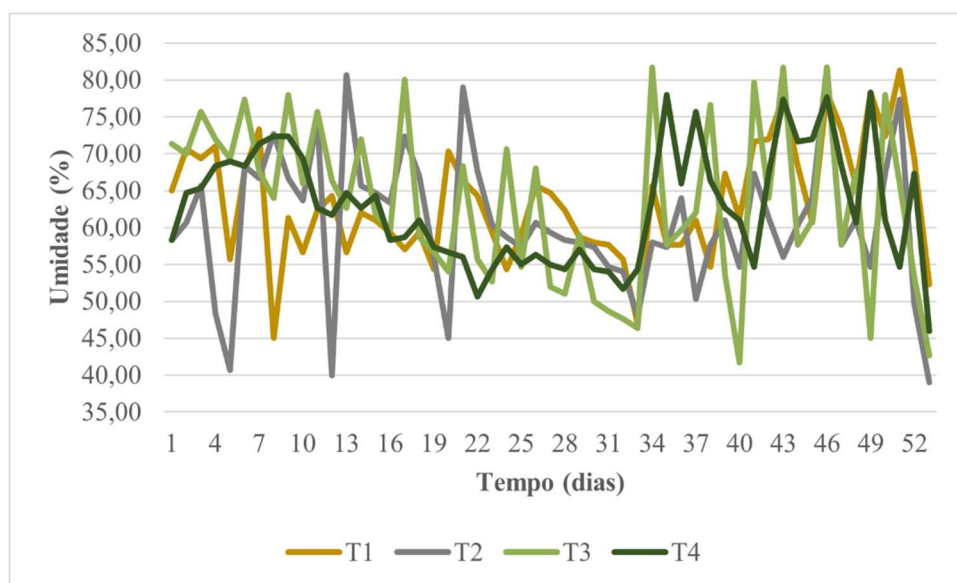
voláteis, indicando que o material se encontra estabilizado, embora ainda contenha frações orgânicas recalcitrantes.

6.4 Resposta dos tratamentos no experimento em vasos

6.4.1 Controle da umidade nos vasos ao longo do experimento

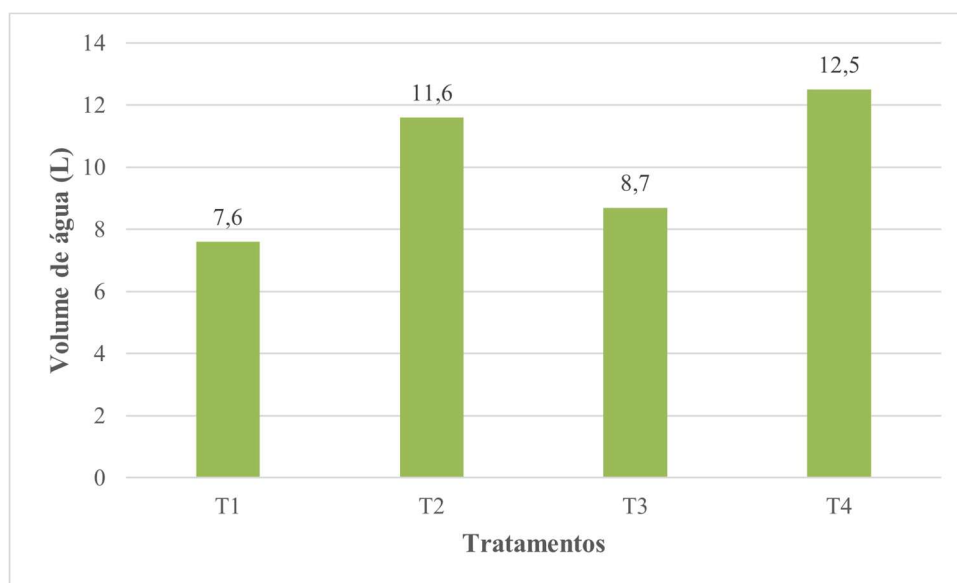
A análise das médias, do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV) demonstrou diferenças entre os tratamentos quanto à uniformidade da umidade nos vasos. O tratamento T1 apresentou baixa variabilidade, com valores reduzidos de DP e CV na maior parte do período. O T2 apresentou maior amplitude de umidade e os maiores valores de CV, indicando menor uniformidade entre os vasos. O T3 apresentou variabilidade intermediária, enquanto o T4 manteve baixos valores de DP e CV durante grande parte do experimento, caracterizando maior homogeneidade. De modo geral, os resultados evidenciam que os tratamentos diferiram não apenas quanto à umidade média, mas também quanto à uniformidade da distribuição da umidade ao longo do período experimental. A variação média da umidade do solo ao longo do período experimental de 53 dias nos diferentes tratamentos está apresentada nas Figuras 22 e 23. Os valores individuais de umidade registrados em cada vaso, bem como as médias, o desvio padrão, o coeficiente de variação e os volumes de água adicionados, encontram-se detalhados no Apêndice E, que reúne o conjunto completo dos dados experimentais.

Figura 21 - Média da variação da umidade do solo nos tratamentos ao longo do período experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 22 - Volume de água aplicado nos tratamentos ao longo do período experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

Observou-se variação da umidade do solo entre os tratamentos em função das diferentes condições de adubação avaliadas, refletindo diretamente no volume de água aplicado ao longo do experimento. Os tratamentos contendo composto orgânico apresentaram maior demanda hídrica, com volumes acumulados de 11,6 L no T2 (solo + composto orgânico) e 12,5 L no T4 (solo + composto orgânico + 50% de NPK). Em contrapartida, os menores volumes acumulados foram registrados nos tratamentos T1 (solo sem adubação), com 7,6 L, e T3 (solo + 100% de fertilizante mineral NPK), com 8,7 L.

O tratamento T1 apresentou oscilações moderadas da umidade ao longo do período experimental, comportamento esperado devido à ausência de adubação, que resultou em menor desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, menor consumo hídrico. Já o tratamento T2 apresentou maior variação dos teores de umidade, incluindo períodos com valores inferiores a 45% (Figura 22), associados à necessidade de maior reposição de água. Esse comportamento sugere maior consumo hídrico pelo sistema solo-planta, possivelmente relacionado ao maior desenvolvimento vegetativo observado nesse tratamento, conforme discutido no item 6.5.2.

Segundo Lal (2001) e Lehmann e Kleber (2015), a matéria orgânica desempenha papel fundamental na qualidade do solo, favorecendo a formação de agregados estáveis, a melhoria da estrutura e influenciando diversos processos físicos, químicos e biológicos. Além disso, sua presença contribui para o aumento da capacidade de retenção de água no solo, favorecendo o desenvolvimento das plantas (BRADY; WEIL, 2013).

No presente estudo, embora os tratamentos contendo composto orgânico possivelmente tenham apresentado maior capacidade de retenção hídrica, uma hipótese é que o maior desenvolvimento vegetativo das plantas tenha resultado em aumento da evapotranspiração e da demanda por reposição de água ao longo do período experimental. Esse comportamento pode estar associado ao incremento da área foliar e, conseqüentemente, ao maior consumo hídrico da cultura do milho (OLIVEIRA; SILVA; CAMPOS, 1993).

O tratamento T3 apresentou, em diversos momentos, elevados valores médios de umidade, porém com comportamento irregular, incluindo quedas acentuadas em determinados períodos. Apesar da presença de fertilização mineral, o menor volume acumulado de água aplicado em comparação aos tratamentos contendo composto orgânico indica menor demanda hídrica do sistema. Entretanto, no presente estudo, o desenvolvimento observado nesse tratamento foi inferior aos tratamentos contendo composto orgânico, tendência posteriormente corroborada pelos resultados de crescimento, produção de biomassa e desenvolvimento fenológico apresentados no item 6.5.2.

Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que a adubação mineral isolada, embora forneça nutrientes essenciais, não promoveu melhorias significativas nas condições gerais de desenvolvimento das plantas quando comparada à presença de matéria orgânica. Dessa forma, a ausência dos benefícios físicos normalmente associados à matéria orgânica pode ter contribuído para o menor desempenho observado nesse tratamento, resultando em um menor volume de água.

Por sua vez, o tratamento T4 apresentou comportamento intermediário quanto às oscilações da umidade do solo, porém com o maior volume acumulado de água aplicado durante

o experimento (12,5 L). A associação entre matéria orgânica e fertilização mineral parcial possivelmente favoreceu melhores condições para o desenvolvimento das plantas, em razão da maior disponibilidade de nutrientes e das melhorias nas propriedades físicas do solo. Entretanto, embora o T4 tenha apresentado desempenho superior aos tratamentos T1 e T3, seus resultados foram inferiores aos observados no T2, tendência posteriormente corroborada pelos parâmetros de crescimento, biomassa e desenvolvimento fenológico apresentados no item 6.5.2.

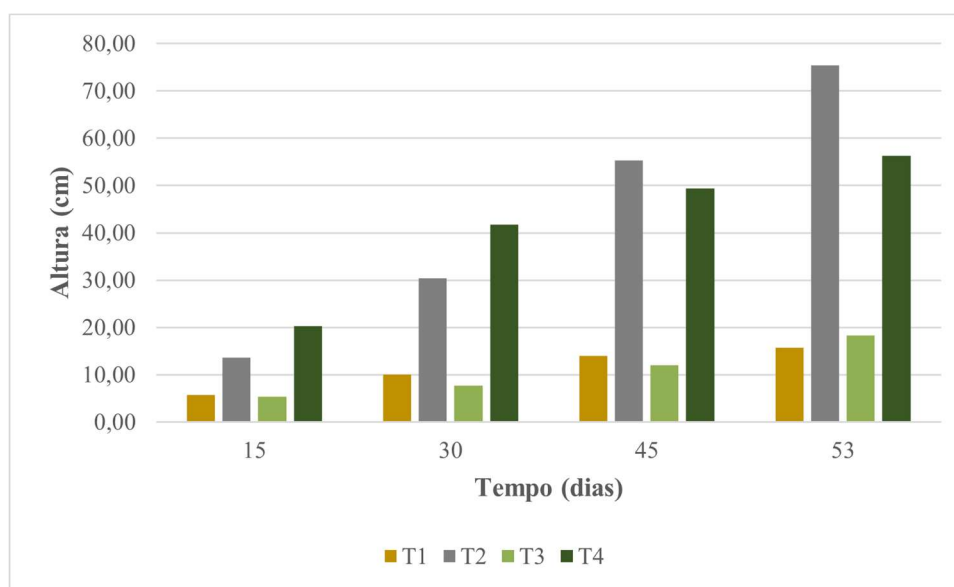
Uma hipótese para o desempenho inferior ao observado no T2 é que as condições de umidade observadas no tratamento após 45 dias possam ter influenciado a resposta fisiológica das plantas ao longo do experimento. Embora não tenham sido realizadas avaliações diretas da disponibilidade de oxigênio no solo, estudos indicam que níveis elevados de umidade podem reduzir a disponibilidade de ar nos poros e afetar o desenvolvimento vegetal (REICHARDT; TIMM, 2012; TAIZ et al., 2017).

6.4.2 Parâmetros de crescimento e desenvolvimento do milho

6.4.2.1 Monitoramento da altura do milho

O monitoramento da altura das plantas revelou respostas distintas entre os tratamentos avaliados, indicando influência direta das condições de adubação sobre o desenvolvimento vegetativo do milho, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 23 - Crescimento médio da altura do milho ao longo de 53 dias por tratamento



Fonte: Elaborada pela autora.

De maneira geral, os tratamentos contendo composto orgânico (T2 e T4) apresentaram maior crescimento em relação ao controle (T1) e ao fertilizante mineral isolado (T3), com variações ao longo do ciclo de desenvolvimento.

Nas avaliações iniciais, o T4 (solo + composto orgânico + 50% de fertilizante mineral NPK) apresentou maior crescimento vegetativo, com médias de 20,33 cm aos 15 dias e 41,67 cm aos 30 dias. O T2 (solo + composto orgânico), por sua vez, apresentou valores inferiores nesse período inicial (13,67 cm e 30,33 cm, respectivamente). Esse comportamento pode estar associado à maior disponibilidade imediata de nutrientes no tratamento com fertilização mineral combinada, favorecendo uma resposta inicial mais rápida do milho, uma vez que fertilizantes minerais apresentam liberação mais rápida de nutrientes em comparação à matéria orgânica. Além disso, a incorporação de matéria orgânica melhora a qualidade do solo (MAGALHÃES; DURÃES, 2002; KIEHL, 1998).

Entretanto, ao longo do desenvolvimento da cultura, observou-se inversão nesse padrão. O T2 passou a apresentar crescimento superior, atingindo 55,33 cm aos 45 dias e 75,33 cm ao final do experimento (53 dias), enquanto o T4 apresentou 49,33 cm e 56,33 cm, respectivamente. Esse resultado sugere que o composto orgânico, quando aplicado isoladamente, pode ter proporcionado maior sustentabilidade nutricional ao longo do ciclo, em função da liberação gradual de nutrientes e da melhoria contínua das propriedades físicas e químicas do solo (KIEHL, 1998; LEHMANN; KLEBER, 2015). Além disso, apesar do alto teor de sódio observado no composto, não foram identificados efeitos negativos sobre o crescimento do milho nas condições avaliadas.

Por outro lado, o tratamento com fertilizante mineral isolado (T3) apresentou baixo desempenho ao longo de todo o período avaliado, com valores próximos aos observados no tratamento controle (T1). Esse resultado contrasta com o esperado com base na literatura, na qual fertilizantes minerais, como o NPK, são amplamente reconhecidos por promoverem o crescimento vegetal devido ao fornecimento direto de nutrientes essenciais (ZHANG et al., 2024), indicando a possível ocorrência de fatores limitantes no sistema experimental.

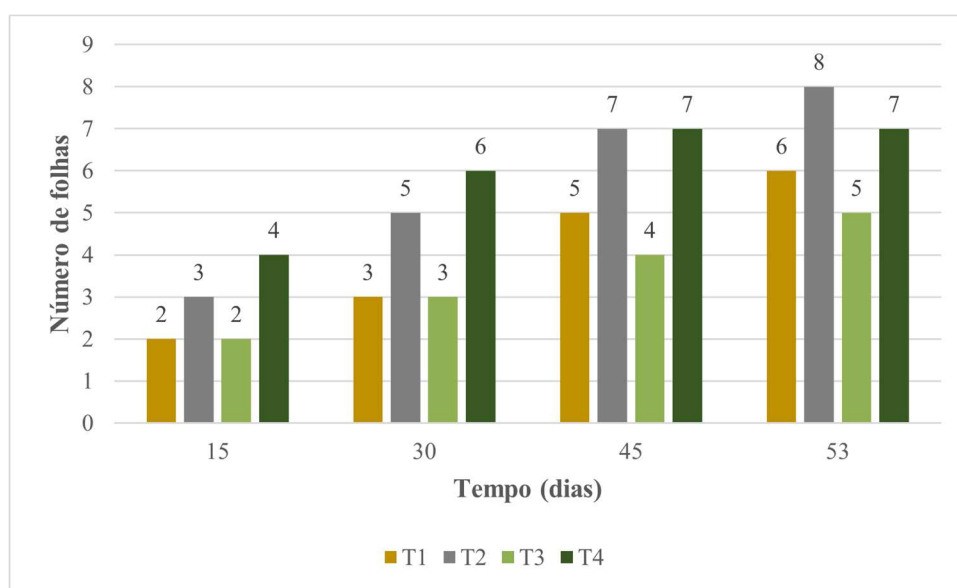
Nesse contexto, o desempenho reduzido pode estar associado a diferentes fatores, como a ausência de matéria orgânica, que compromete a retenção e a disponibilização gradual de nutrientes ou desequilíbrios nutricionais (KIEHL, 2004). Destaca-se que o solo inicial apresentou teor de matéria orgânica de 16 g/dm³, conforme indicado na Tabela 4, valor classificado como moderado de acordo com Raij (2001), por se enquadrar na faixa média de 15 a 25 g/dm³.

De maneira integrada, os resultados evidenciam que o composto orgânico exerceu papel determinante no crescimento do milho, destacando-se especialmente no tratamento isolado (T2), que apresentou os maiores valores de altura ao final do ciclo. Esses achados reforçam o potencial agrônomo do uso de resíduos orgânicos como fonte de nutrientes e condicionador do solo, promovendo desenvolvimento mais consistente ao longo do ciclo vegetativo da cultura nas condições avaliadas.

6.4.2.2 Monitoramento do número de folhas do milho

O número médio de folhas do milho variou entre os tratamentos ao longo do período experimental (Figura 25), indicando efeito das estratégias de adubação no desenvolvimento vegetativo da cultura.

Figura 24 - Evolução do estágio fenológico médio do milho ao longo de 53 dias por tratamento



Fonte: Elaborada pela autora.

Nas avaliações iniciais, o tratamento T4 (solo + composto orgânico + 50% de NPK) apresentou os maiores valores médios de folhas expandidas aos 15 e 30 dias a partir da semeadura, com médias de 4 e 6 folhas, respectivamente, indicando maior emissão foliar durante o estabelecimento inicial das plantas em comparação aos demais tratamentos.

Ao longo do período experimental, observou-se alteração nesse comportamento, com destaque para o tratamento T2 (solo + composto orgânico), que apresentou os maiores números médios de folhas aos 45 dias (7 folhas) e aos 53 dias após a semeadura (8 folhas). Esse resultado

evidencia maior progressão fenológica da cultura sob esse tratamento. Nesse contexto, verifica-se que, embora o T4 tenha favorecido o desenvolvimento inicial, esse efeito não se manteve ao longo do ciclo, sendo superado pelo T2 nas avaliações posteriores.

O desenvolvimento foliar constitui um importante indicador do crescimento do milho, uma vez que está diretamente relacionado à expansão da área foliar e à interceptação de luz. Assim, os maiores valores observados no tratamento T2 sugerem maior capacidade de interceptação de radiação ao longo do período experimental, contribuindo para o avanço fenológico verificado. As folhas, por serem os principais órgãos fotossintetizantes, influenciam diretamente o desenvolvimento das plantas (BOS; TIJANI-ENIOLA; STRUIK, 2000). Além disso, o desenvolvimento das folhas resulta de processos coordenados de iniciação, expansão e diferenciação celular, os quais determinam a arquitetura da planta e influenciam seu crescimento ao longo do ciclo (STRABLE et al., 2021).

Considerando que o experimento foi conduzido até o estágio fenológico V8, duas repetições do tratamento T2 atingiram esse estágio ao final do período experimental, indicando maior avanço fenológico sob esse tratamento. Esse resultado difere do observado por Alves (2026), no qual a associação entre composto orgânico e NPK promoveu o alcance mais precoce do estágio V8, comportamento semelhante ao verificado inicialmente no tratamento T4 neste estudo.

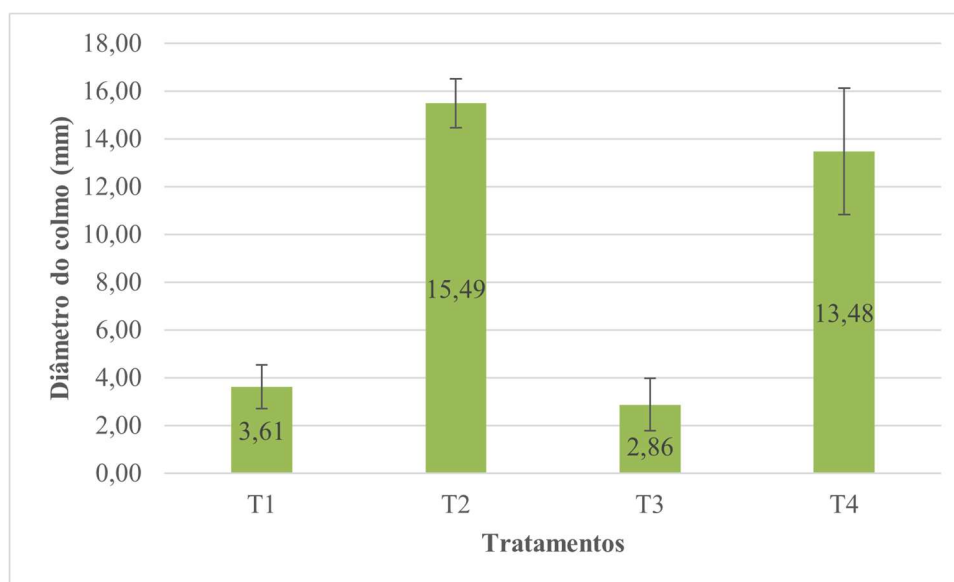
Em contrapartida, o tratamento T3 (solo + 100% de fertilizante mineral NPK) apresentou os menores números médios de folhas durante praticamente todo o período experimental, atingindo média final de 5 folhas, valor inferior ao observado no tratamento controle (T1), que apresentou média de 6 folhas aos 53 dias. Esse comportamento contrasta com Santos et al. (2021), que verificaram aumento no número de folhas com a aplicação de NPK. Ressalta-se que o número de folhas está relacionado ao desenvolvimento da planta, sendo influenciado por fatores como a fertilidade do solo, o clima e o material genético (Brito et al., 2010). Entretanto, como não foram realizadas avaliações complementares relacionadas aos atributos químicos do solo ou a variáveis fisiológicas das plantas, não é possível determinar os fatores responsáveis por essa resposta.

Assim, os resultados obtidos indicam que o tratamento T4 promoveu maior emissão foliar no estágio inicial da cultura, enquanto o tratamento T2 proporcionou maior número de folhas completamente expandidas e maior avanço fenológico ao final do período avaliado, evidenciando diferenças na dinâmica de desenvolvimento ao longo do ciclo em função das estratégias de adubação adotadas.

6.4.2.3 Diâmetro do colmo ao final do experimento

O diâmetro do colmo do milho ao final do experimento apresentou variação entre os tratamentos avaliados conforme apresentado na Figura 26.

Figura 25 - Diâmetro médio do colmo do milho ao final do experimento por tratamento



Fonte: Elaborada pela autora. Barras de erro indicam o desvio padrão.

O tratamento T2 (solo + composto orgânico) apresentou o maior valor médio, com $15,49 \pm 1,02$ mm, seguido pelo tratamento T4 (solo + composto orgânico + 50% de NPK), com média de $13,48 \pm 2,65$ mm. Os menores valores foram observados nos tratamentos T1 (controle) e T3 (solo + NPK), que apresentaram médias de $3,61 \pm 0,92$ mm e $2,86 \pm 1,10$ mm, respectivamente.

Os resultados indicam que os tratamentos contendo composto orgânico favoreceram maior desenvolvimento do colmo em comparação aos tratamentos sem adição de matéria orgânica. Resultados semelhantes foram observados por Alves (2026), que também verificou maiores valores de diâmetro do colmo em tratamentos com aplicação de matéria orgânica, evidenciando o efeito positivo desses insumos sobre o vigor estrutural das plantas de milho. O melhor desempenho observado no T2 sugere que o composto orgânico, aplicado isoladamente, promoveu condições favoráveis ao crescimento do milho nas condições experimentais adotadas. Esse comportamento reforça a importância da adubação orgânica como estratégia de manejo voltada à manutenção da qualidade do solo e à sustentabilidade ambiental, uma vez que a incorporação de resíduos orgânicos pode contribuir para o desenvolvimento vegetativo da cultura, além de melhorar a disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo (SHOWLER, 2015; GOMES et al., 2005).

O tratamento T4 apresentou valor médio próximo ao obtido em T2, mesmo com redução de 50% da dose de fertilizante mineral NPK, indicando potencial do composto orgânico como complemento parcial à adubação mineral. Entretanto, o maior desvio padrão observado nesse tratamento ($\pm 2,65$ mm) evidencia maior variabilidade entre as repetições quando comparado ao T2, que apresentou menor dispersão dos dados e maior uniformidade de resposta.

Por outro lado, o tratamento T3 apresentou menor desenvolvimento do colmo, com valores inclusive inferiores aos observados no tratamento controle. Esse comportamento pode estar relacionado à menor eficiência de uso de nutrientes em sistemas com aplicação isolada de fertilizantes minerais, especialmente sob condições de restrição física e química do solo, como observado em experimentos em vasos (KIAER et al., 2013). Segundo Fageria e Baligar (2005), a eficiência de uso de nutrientes é reduzida na ausência de equilíbrio entre os elementos essenciais no sistema solo-planta, enquanto desequilíbrios nutricionais podem comprometer processos fisiológicos e limitar o crescimento vegetal, mesmo na presença de nutrientes disponíveis (MALAVOLTA, 2006).

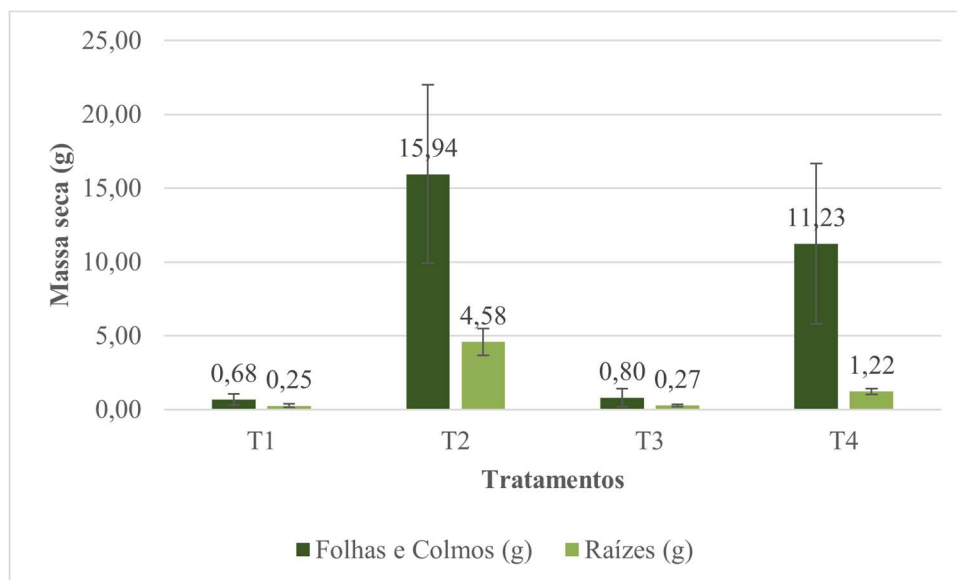
Além disso, condições de cultivo em vasos podem intensificar efeitos de concentração salina e alterar a dinâmica de disponibilidade de nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2017). Considerando o pH ácido do solo, esse fator pode ter contribuído para o desempenho inferior observado no T3. Em contrapartida, a adição de matéria orgânica nos demais tratamentos pode ter atenuado a acidez e reduzido a toxidez por Al^{3+} , favorecendo a disponibilidade de nutrientes (ARAÚJO et al., 2012).

O diâmetro do colmo é considerado um importante parâmetro morfológico relacionado ao vigor vegetativo e à sustentação da planta, além de atuar como órgão de reserva, influenciando o enchimento de grãos e, consequentemente, a produtividade da cultura (CRUZ et al., 2008). Dessa forma, os resultados obtidos indicam potencial agrônômico do composto orgânico proveniente de resíduos de incubatórios avícolas, especialmente quando aplicado isoladamente ou associado à redução parcial da adubação mineral, favorecendo o desenvolvimento vegetativo do milho nas condições experimentais avaliadas.

6.5.2.4 Biomassa seca ao final do experimento

Os valores médios de biomassa seca das plantas de milho ao final do experimento estão apresentados na Figura 27.

Figura 26 - Biomassa seca média da parte aérea e das raízes do milho por tratamento



Fonte: Elaborada pela autora. Barras de erro indicam o desvio padrão.

Os resultados evidenciaram diferenças expressivas entre os tratamentos quanto à produção de biomassa seca da parte aérea. O tratamento T2 (solo + composto orgânico) apresentou os maiores valores médios de massa seca de folhas e colmos, com $15,94 \pm 6,05$ g, indicando maior desenvolvimento vegetativo das plantas. Em seguida, destacou-se o tratamento T4 (solo + composto orgânico + 50% de NPK), com média de $11,23 \pm 5,43$ g. Por outro lado, os tratamentos T1 (controle) e T3 (100% NPK) apresentaram menores valores médios, correspondendo a $0,68 \pm 0,38$ g e $0,80 \pm 0,60$ g, respectivamente.

O acúmulo de biomassa seca constitui um dos principais indicadores do avanço do ciclo vegetativo das plantas, uma vez que, durante a fase vegetativa, ocorre intensificação da produção e do acúmulo de matéria seca nos tecidos estruturais, especialmente folhas e colmos (TAIZ; ZEIGER, 2017). Nesse contexto, os maiores valores observados nos tratamentos T2 e T4 refletem um estágio mais avançado de desenvolvimento vegetativo em comparação aos tratamentos T1 e T3.

O desempenho superior do tratamento T2 pode estar relacionado à maior disponibilidade de nutrientes proporcionada pelo composto orgânico, especialmente o cálcio, frequentemente presente em concentrações relevantes em resíduos utilizados na compostagem, como cascas de ovos e resíduos vegetais. Segundo Sengik (2003), o cálcio é essencial para o desenvolvimento do sistema radicular, atuando diretamente na formação e no crescimento das raízes. Sua deficiência pode ocasionar irregularidades no crescimento das plantas, comprometendo o desenvolvimento vegetativo. Nesse sentido, é possível que a presença desse nutriente no composto tenha contribuído para a expansão radicular e, conseqüentemente, para

o aumento da capacidade de absorção de água e nutrientes, refletindo em maior produção de biomassa da parte aérea.

O tratamento T4 também apresentou elevado acúmulo de biomassa seca, embora inferior ao T2, o que pode estar associado à combinação entre o fornecimento de nutrientes pelo composto orgânico e a complementação promovida pela adubação mineral. A presença do composto nesse tratamento pode ter contribuído para o aporte de cálcio e matéria orgânica, favorecendo condições mais adequadas ao crescimento das plantas.

Em relação à biomassa seca das raízes, observou-se comportamento semelhante ao verificado para a parte aérea. O tratamento T2 apresentou a maior média de massa seca radicular, com $4,58 \pm 0,92$ g, seguido pelo T4, com $1,22 \pm 0,20$ g. Os menores valores foram registrados nos tratamentos T1 e T3, com médias de $0,25 \pm 0,12$ g e $0,27 \pm 0,08$ g, respectivamente.

O maior desenvolvimento radicular observado nos tratamentos com composto orgânico pode estar associado tanto ao fornecimento de cálcio quanto às melhorias nas condições físicas do solo promovidas pela matéria orgânica. Conforme discutido nos itens 6.5.4.1 e 6.5.4.2, os tratamentos T2 e T4 apresentaram menores valores de densidade e maiores valores de porosidade, características que favorecem a expansão do sistema radicular e a exploração do volume de solo pelas raízes.

Entretanto, deve-se considerar que o experimento foi conduzido em vasos, condição que pode impor limitações ao crescimento radicular devido à restrição física do volume explorável, além de alterar a dinâmica de água, nutrientes e oxigenação do solo. Segundo Passioura (2006) e Sinclair et al. (2017), experimentos conduzidos em recipientes podem gerar respostas fisiológicas distintas daquelas observadas em condições de campo, especialmente em função das restrições ao desenvolvimento radicular. De acordo com Taiz e Zeiger (2017), alterações na disponibilidade de oxigênio e nutrientes na zona radicular podem influenciar diretamente a absorção de recursos e o crescimento vegetal. Assim, embora os resultados evidenciem a superioridade dos tratamentos com composto orgânico, os valores absolutos de biomassa devem ser interpretados considerando as limitações inerentes às condições experimentais adotadas.

Além disso, os valores de biomassa radicular apresentaram relação consistente com os resultados obtidos nos itens 6.5.4.1 e 6.5.4.2, nos quais se observou aumento da porosidade e redução da densidade do solo em função da aplicação de matéria orgânica. Esses efeitos indicam melhoria das condições físicas do solo, favorecendo o crescimento radicular.

Resultados semelhantes foram reportados por Carmo (2025), em que tratamentos com composto orgânico promoveram maior acúmulo de matéria seca tanto na raiz quanto na parte aérea. De acordo com Kiehl (1985), esse comportamento está associado à melhoria das condições físicas e biológicas do solo proporcionadas pela matéria orgânica.

Adicionalmente, Rosolem et al. (1999) destacam que o desenvolvimento radicular é diretamente influenciado pelas características do meio em que se estabelece, especialmente atributos físicos como densidade e porosidade, os quais condicionam a expansão e a atividade das raízes.

Dessa forma, os resultados indicam que a utilização do composto orgânico, isoladamente ou em associação à adubação mineral, favoreceu o desenvolvimento vegetativo do milho, promovendo maior acúmulo de biomassa seca tanto na parte aérea quanto nas raízes, com destaque para o tratamento T2, que apresentou os maiores valores para ambas as variáveis avaliadas.

6.4.3 Influência do aporte de nutrientes entre os tratamentos

A influência do aporte de nutrientes entre os tratamentos (Tabela 1) esteve associada às variações observadas nas variáveis de crescimento e desenvolvimento do milho. De modo geral, verificou-se tendência de maior desenvolvimento vegetativo nos tratamentos com maior disponibilidade de nutrientes, sugerindo relação entre o fornecimento nutricional e a resposta das plantas.

O tratamento T1 (solo sem adubação) não recebeu aporte externo de nutrientes, sendo utilizado como condição controle do experimento. O tratamento T2, com adição de composto orgânico, apresentou maior fornecimento de nutrientes, com destaque para Ca ($64,54 \text{ g vaso}^{-1}$), N ($7,2000 \text{ g vaso}^{-1}$), P_2O_5 ($3,9900 \text{ g vaso}^{-1}$) e K_2O ($1,2200 \text{ g vaso}^{-1}$), além de micronutrientes, evidenciando maior diversidade nutricional em relação ao controle.

O tratamento T3, com aplicação exclusiva de NPK em baixa dose, apresentou os menores valores de N ($0,2770 \text{ g vaso}^{-1}$), P_2O_5 ($0,9700 \text{ g vaso}^{-1}$) e K_2O ($0,5540 \text{ g vaso}^{-1}$) entre os tratamentos fertilizados, indicando menor aporte desses nutrientes quando comparado aos demais tratamentos.

O tratamento T4, que combinou composto orgânico e 50% da dose de NPK, apresentou o maior aporte global de nutrientes, com destaque para N ($7,3390 \text{ g vaso}^{-1}$), P_2O_5 ($4,4760 \text{ g vaso}^{-1}$), K_2O ($1,4980 \text{ g vaso}^{-1}$) e elevados teores de Ca ($64,5400 \text{ g vaso}^{-1}$). No entanto, não se observou superioridade consistente deste tratamento nas variáveis avaliadas, indicando que a

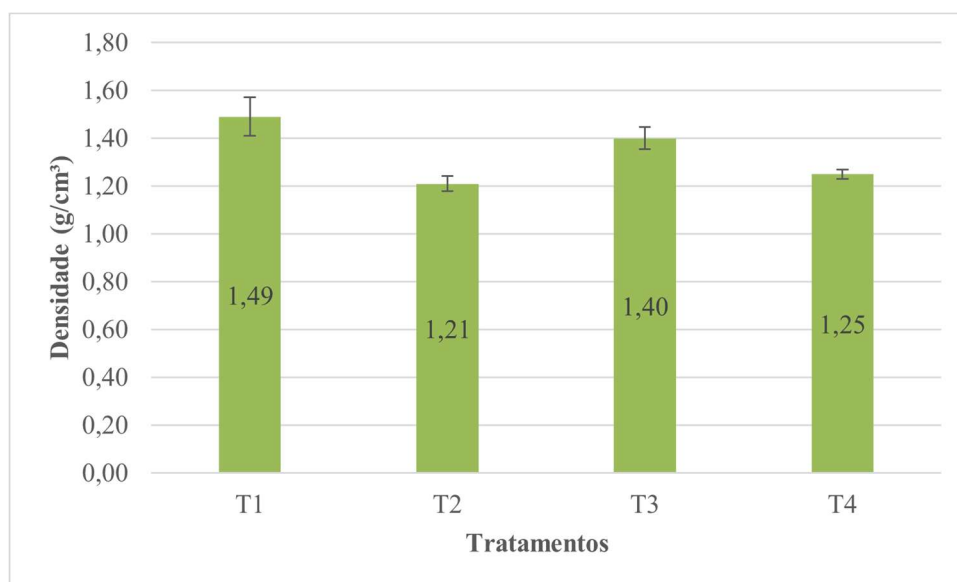
resposta das plantas não foi estritamente proporcional ao aumento do aporte de nutrientes nas condições do experimento.

6.4.4 Indicadores físicos da qualidade do solo

6.4.4.1 Densidade do solo

Os valores médios de densidade do solo ao final do experimento evidenciaram influência direta dos diferentes insumos sobre os atributos físicos do solo (Figura 28). Considerando que a densidade inicial do solo utilizada em todos os tratamentos foi de $1,39 \text{ g cm}^{-3}$, observou-se alteração desse parâmetro ao final do experimento.

Figura 27 - Densidade média do solo ao final do experimento por tratamento



Fonte: Elaborada pela autora. Barras de erro indicam o desvio padrão.

O tratamento T1 (solo sem adubação) apresentou aumento da densidade em relação à condição inicial, atingindo média final de $1,49 \pm 0,08 \text{ g cm}^{-3}$, evidenciando tendência de maior compactação do solo na ausência de adubação e de aporte de matéria orgânica. De forma semelhante, o tratamento T3 (solo + 100% de fertilizante mineral NPK) apresentou densidade média de $1,40 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$, valor próximo à condição inicial. De forma geral, observou-se que os tratamentos sem adição de composto orgânico apresentaram tendência de aumento da densidade em relação ao valor inicial, enquanto aqueles com adição de composto mostraram comportamento oposto, com redução da densidade.

Em contraste, os tratamentos com adição de composto orgânico apresentaram redução da densidade em relação ao valor inicial. O tratamento T2 (solo + composto orgânico)

apresentou a menor densidade média ($1,21 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$), correspondendo a uma redução de aproximadamente 13%. O tratamento T4 (solo + composto orgânico + 50% de NPK) apresentou densidade média de $1,25 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$, também inferior ao valor inicial, evidenciando o efeito positivo da matéria orgânica no solo. Ressalta-se que, na montagem de todos os vasos, foi mantida a densidade equivalente à obtida em campo, com ajuste das proporções dos materiais, de modo a compensar o menor peso específico do composto orgânico em relação ao solo.

A redução da densidade observada nos tratamentos com composto orgânico indica aumento da porosidade do solo. Segundo Batey e McKenzie (2006), o incremento da densidade está diretamente relacionado à diminuição da porosidade e da permeabilidade, podendo limitar o crescimento das plantas. Nesse sentido, os valores obtidos nos tratamentos T2 e T4 indicam condições físicas mais favoráveis ao desenvolvimento do milho. Reichardt (1990) considera valores de densidade de até $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$ adequados para essa cultura, enquanto Rosolem et al. (1994) relatam que densidades inferiores a $2,0 \text{ kg dm}^{-3}$ não comprometem o desenvolvimento da raiz principal, indicando ausência de restrições físicas severas nos tratamentos avaliados.

O efeito mais expressivo observado no tratamento T2 sugere que a aplicação isolada do composto orgânico promoveu maior eficiência na melhoria do solo. Embora o tratamento T4 também tenha reduzido a densidade, os valores ligeiramente superiores aos observados no T2 indicam que a associação com fertilização mineral parcial não potencializou o efeito estrutural da matéria orgânica nas condições avaliadas.

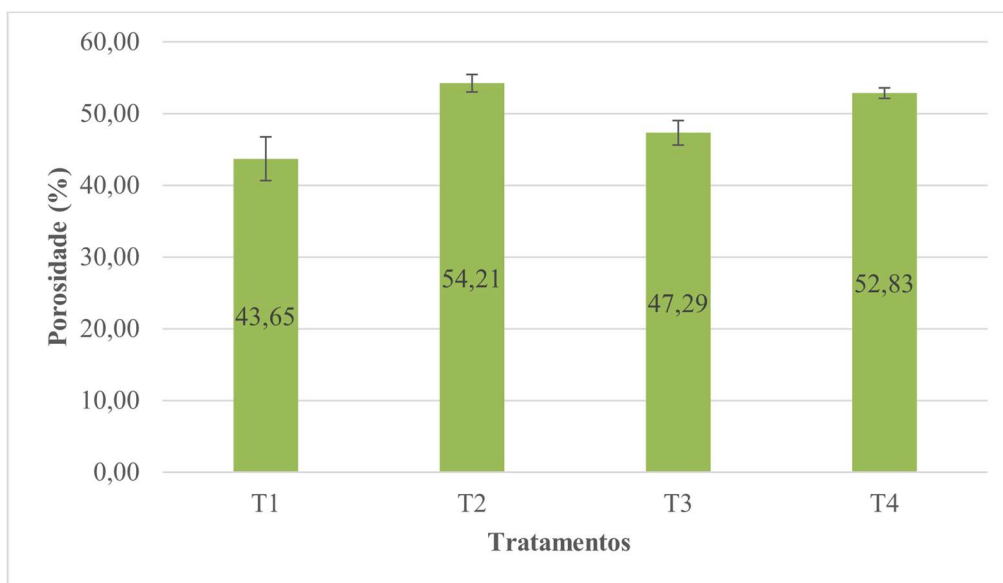
Os resultados obtidos são consistentes com aqueles observados para a matéria seca da raiz. De acordo com Rosolem et al. (1999), o aumento da densidade do solo está associado à redução no acúmulo de biomassa radicular, em função das restrições físicas ao crescimento das raízes.

Adicionalmente, os resultados corroboram estudos que demonstram que a adição de matéria orgânica promove a redução da densidade do solo, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas (CARMO, 2025; ALVES, 2026). Dessa forma, a menor densidade observada nos tratamentos com composto orgânico está diretamente associada às melhores respostas em crescimento vegetativo, produção de biomassa e desenvolvimento radicular, evidenciando o papel fundamental da matéria orgânica na qualidade física do solo e no desempenho da cultura do milho.

6.4.4.2 Porosidade do solo

Os valores médios de porosidade do solo ao final do experimento apresentaram comportamento inversamente proporcional aos resultados de densidade, evidenciando a influência das diferentes estratégias de adubação sobre a estrutura física do solo (Figura 29). Considerando a porosidade inicial de 42,23% em todos os vasos, observou-se incremento desse parâmetro ao longo do período experimental, especialmente nos tratamentos com adição de composto orgânico.

Figura 28 - Porosidade média do solo ao final do experimento por tratamento



Fonte: Elaborada pela autora. Barras de erro indicam o desvio padrão.

O tratamento T2 (solo + composto orgânico) apresentou a maior porosidade média ($54,21 \pm 1,21\%$), representando aumento de aproximadamente 28% em relação à condição inicial. Em seguida, o tratamento T4 (solo + composto orgânico + 50% de fertilizante mineral NPK) apresentou média de $52,83 \pm 0,75\%$, também superior ao valor inicial. Os menores valores foram observados nos tratamentos T3 (solo + 100% de fertilizante mineral NPK), com $47,29 \pm 1,74\%$, e T1 (solo sem adubação), com $43,65 \pm 3,05\%$, sendo este último apenas ligeiramente superior à porosidade inicial.

Os resultados demonstram que a incorporação do composto orgânico promoveu aumento da porosidade total. A porosidade é um dos principais indicadores da qualidade do solo, pois está diretamente relacionada à circulação de água e ar, ao crescimento radicular e à disponibilidade de nutrientes (ARSHAD et al., 1996). De acordo com Reichardt (1990), os macroporos são responsáveis pelo movimento de água e ar e pelo desenvolvimento das raízes, enquanto os microporos atuam no armazenamento de água, evidenciando a importância de um sistema poroso equilibrado.

Nesse contexto, a matéria orgânica exerce papel fundamental na melhoria das propriedades físicas do solo, favorecendo a agregação das partículas, a estabilidade estrutural e a formação de um sistema poroso mais estável e funcional (STEVENSON, 1994; BALDOCK; NELSON, 2000). Assim, os maiores valores de porosidade observados nos tratamentos com composto orgânico indicam condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal e à dinâmica hídrica do solo.

O maior valor observado no tratamento T2 reforça a eficiência do composto orgânico aplicado isoladamente na melhoria da estrutura do solo. A menor variabilidade entre as repetições ($\pm 1,21\%$) sugere maior estabilidade estrutural nesse tratamento, em concordância com os menores valores de densidade observados, evidenciando a relação inversa entre compactação e porosidade.

O tratamento T4 apresentou comportamento semelhante ao T2, embora com valores ligeiramente inferiores de porosidade. Ainda assim, a associação entre composto orgânico e fertilização mineral promoveu melhorias físicas significativas em relação aos tratamentos sem adição de matéria orgânica.

Por outro lado, os menores valores de porosidade observados nos tratamentos T1 e T3 indicam condições físicas menos favoráveis ao crescimento das plantas. A redução do volume de poros pode limitar a infiltração e o armazenamento de água, restringir as trocas gasosas e aumentar a resistência mecânica à penetração radicular. Esse comportamento está associado ao processo de compactação, no qual o aumento da densidade resulta na diminuição da porosidade. Segundo Batey e McKenzie (2006), a compactação do solo promove alterações estruturais que reduzem a porosidade e a permeabilidade, além de afetar negativamente o crescimento radicular. De forma complementar, Conte et al. (2011) destacam que solos compactados apresentam baixa porosidade, comprometendo o desenvolvimento vegetal.

Considerando que porosidade e densidade são propriedades diretamente relacionadas e amplamente utilizadas como indicadores da qualidade física do solo (ARSHAD et al., 1996), os resultados obtidos reforçam a contribuição do composto orgânico para a melhoria da qualidade do solo. Dessa forma, o uso do composto orgânico oriundo de resíduos de incubatórios avícolas promoveu aumento da porosidade e redução da densidade, favorecendo o desenvolvimento radicular, resultando em condições mais adequadas ao crescimento do milho nas condições experimentais avaliadas.

6.4.4.3 Estabilidade estrutural do solo

A estabilidade estrutural do solo após a aplicação dos diferentes tratamentos foi avaliada por meio do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA), bem como pelos ensaios de desagregação (*Slaking Test*) e dispersão (*Crumb Test*). Os valores médios de IEA estão apresentados na Tabela 8, enquanto os resultados dos ensaios visuais encontram-se na Tabela 9.

Tabela 8 - Média do índice de estabilidade dos agregados (IEA) do solo por tratamento

Tratamentos	IEA (%)
Solo (sem adubação)	95,90
Solo + Composto Orgânico	98,07
Solo + 100% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	94,36
Solo + Composto Orgânico + 50% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	97,30

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios de desagregação (*Slaking Test*) e dispersão (*Crumb Test*) do solo por tratamento

Tratamentos	Tempo de saturação (s)	Início da fissuração (s)	Desagregação total ou parcial (s)	Classificação (<i>Slaking Test</i>)	Grau (<i>Crumb Test</i>)
Solo (sem adubação)	46	65	118	Fraturamento	2
Solo + Composto Orgânico	29	45	87	Fraturamento	3
Solo + 100% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	38	57	114	Fraturamento	2
Solo + Composto Orgânico + 50% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	25	37	62	Dispersão	3

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) mostram variações pouco expressivas entre os tratamentos, embora todos tenham apresentado valores elevados de estabilidade, superiores a 94%. O maior valor foi observado no tratamento T2 (solo + composto orgânico), com 98,07%, seguido por T4 (solo + composto orgânico + 50% de fertilizante mineral NPK), com 97,30%. Os menores valores foram registrados em T1 (solo sem adubação) e T3 (solo + 100% de fertilizante mineral NPK), com 95,90% e 94,36%, respectivamente.

Apesar da elevada estabilidade estrutural em todos os tratamentos, os maiores valores observados em T2 e T4 indicam incremento na estabilidade dos agregados associado à aplicação do composto orgânico. Esse comportamento pode ser relacionado ao papel da matéria orgânica na formação e estabilização da estrutura do solo. Ressalta-se, no entanto, que o período experimental de 53 dias é relativamente curto para a avaliação de alterações estruturais no solo, devendo os resultados ser interpretados com cautela. Segundo Tisdall e Oades (1982), a matéria orgânica atua como agente cimentante na formação de macroagregados estáveis. De forma complementar, Haynes e Swift (1990) e Wendling et al. (2005) destacam que a redução dos teores de matéria orgânica está diretamente associada à degradação estrutural dos solos.

Os resultados de IEA também se mostram coerentes com os atributos físicos obtidos neste estudo, uma vez que os tratamentos T2 e T4 apresentaram menor densidade e maior porosidade. Conforme Bayer e Mielniczuk (1999), a agregação do solo está diretamente relacionada a propriedades físicas como densidade, porosidade, infiltração e retenção de água, indicando uma possível melhoria nos atributos físicos associada à adição de matéria orgânica.

Os ensaios de desagregação (*Slaking Test*) e dispersão (*Crumb Test*) evidenciaram diferenças no comportamento dos agregados quando submetidos ao contato direto com a água. Os tratamentos com adição de composto orgânico apresentaram menores tempos de saturação, início de fissuração e desagregação em relação aos tratamentos sem composto. O tratamento T4 apresentou os menores tempos (25 s para saturação, 37 s para fissuração e 62 s para desagregação), sendo classificado como dispersão no *Slaking Test* e grau 3 no *Crumb Test*, enquanto T2 apresentou comportamento semelhante. Em contraste, T1 e T3 apresentaram maiores tempos e foram classificados como fraturamento no *Slaking Test* e grau 2 no *Crumb Test*.

A desagregação mais rápida observada nos tratamentos com composto orgânico não foi acompanhada por redução do IEA, uma vez que esses tratamentos apresentaram os maiores valores de estabilidade. Esse resultado indica que o comportamento observado nos ensaios visuais não deve ser interpretado isoladamente como indicativo de menor estabilidade estrutural. Considerando os resultados de densidade e porosidade obtidos neste estudo, a menor resistência à entrada de água nos agregados pode estar associada à maior porosidade desses tratamentos, favorecendo sua rápida saturação.

A ocorrência de dispersão no tratamento T4 pode estar relacionada às características químicas dos insumos utilizados. Jucksch (1986) relata que fertilizantes minerais contendo cálcio podem influenciar a dinâmica de agregação do solo em determinadas condições. Entretanto, considerando que o composto orgânico também apresenta teores relevantes desse

elemento, o comportamento distinto entre os tratamentos T2 e T4 sugere que esse fator, isoladamente, não explica a ocorrência observada. Nesse sentido, é provável que o efeito esteja associado à interação entre o composto orgânico e o fertilizante mineral, resultando em alterações nas condições químicas da solução do solo. Contudo, essa hipótese não pode ser confirmada com base apenas nos dados obtidos neste estudo.

A estrutura original do solo, obtida em campo, foi alterada durante o peneiramento (Figura 17) e a montagem dos vasos experimentais. Dessa forma, buscou-se realizar um estudo comparativo entre as condições iniciais e finais do experimento, considerando que todos os vasos foram preparados sob as mesmas condições, com manutenção da mesma densidade e garantia de homogeneidade entre as unidades experimentais. Por fim, a divergência entre os resultados do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) e dos ensaios visuais sugere que o comportamento observado pode estar relacionado à dinâmica de entrada de água nos agregados, sendo necessárias análises complementares para sua validação.

7 CONCLUSÃO

A utilização do composto orgânico produzido a partir de resíduos de incubatórios avícolas promoveu melhorias na qualidade física do solo, refletidas pela redução da densidade e aumento da porosidade total. Essas alterações estiveram associadas ao melhor desempenho do milho, evidenciado pelo maior crescimento vegetativo, avanço fenológico, aumento do diâmetro do colmo e maior acúmulo de biomassa seca.

Entre os tratamentos avaliados, o composto orgânico aplicado isoladamente apresentou os resultados mais expressivos para a maioria das variáveis analisadas. Esse comportamento sugere que os benefícios proporcionados pelo composto não se limitaram ao fornecimento de nutrientes, mas também envolveram melhorias nas condições físicas do solo, favorecendo o desenvolvimento radicular e a utilização de água e nutrientes pelas plantas.

A associação entre o composto orgânico e a adubação mineral apresentou resultados satisfatórios, indicando o potencial dessa combinação como estratégia de manejo nutricional. A integração entre fontes orgânicas e minerais pode contribuir para melhorias nas propriedades do solo e no fornecimento de nutrientes às plantas. Entretanto, são necessários estudos adicionais para definir proporções adequadas de aplicação, bem como para avaliar o desempenho dessa associação em condições de campo e ao longo de ciclos completos da cultura.

Os resultados indicam que a qualidade do processo de compostagem foi determinante para a obtenção de um composto com potencial agrônômico. O monitoramento e o manejo dos parâmetros operacionais favoreceram a obtenção de um composto estabilizado, com características químicas adequadas ao uso agrícola, contribuindo para as melhorias observadas na qualidade física do solo e no desenvolvimento da cultura do milho.

Conclui-se que o aproveitamento agrônômico de resíduos de incubatórios avícolas por meio da compostagem representa uma alternativa ambientalmente adequada e tecnicamente promissora para a produção de fertilizantes orgânicos, contribuindo simultaneamente para o manejo sustentável de resíduos, para a melhoria da qualidade do solo e para o desenvolvimento da cultura do milho.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, B. K.; BARRINGTON, S.; MARTINEZ, J.; KING, S. Handling and treatment of poultry hatchery waste: a review. *Sustainability*, Basel, v. 3, n. 1, p. 216–237, 2011. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/3/1/216>. Acesso em: 11 jan. 2026.
- ALVES, Gabriel. Pesquisa de mestrado sobre compostos orgânicos e saúde do solo. Trabalho em andamento. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2026.
- AMORIM, A. C. et al. Compostagem e vermicompostagem de dejetos de caprinos: efeito das estações do ano. *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 1, p. 57–66, 2005.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 25–45, 2002.
- APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017. Método 2540G.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava-PR, v. 5, n. 1, p. 187–206, 2012.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 337–345, 2004.
- ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 88, n. 2, p. 153–160, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13601: solo - avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. Relatório anual 2024. São Paulo: ABPA, 2024. Disponível em: https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.
- AYOUB, A. T. Fertilizers and the environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 55, n. 2, p. 117–121, 1999.
- BALDOCK, J. A.; NELSON, P. N. Soil organic matter. In: SUMMER, M. E. (ed.). *Handbook of soil science*. Georgia: University of Georgia, 2000. p. B25–B84.
- BARACHO, M. S.; NÄÄS, I. de A.; GIGLI, A. C. S. Impacto das variáveis ambientais em incubatório de estágio múltiplo de frangos de corte. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 563–577, jul./ago. 2010.
- BARI, Q. H.; KOENIG, A. Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 33, p. 93–111, 2001.

BATEY, T.; MCKENZIE, D. C. Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use and Management*, v. 22, n. 2, p. 123–131, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 23, n. 2, p. 513–518, 1999.

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 22, p. 5444–5453, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19119002/>. Acesso em: 24 mar. 2026.

BERTOLDI, M. D.; VALLINI, G.; PERA, A. The biology of composting: a review. *Waste Management*, v. 1, p. 157–176, 1983.

BOS, H. J.; TIJANI-ENIOLA, H.; STRUIK, P. C. Morphological analysis of leaf growth of maize: responses to temperature and light intensity. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Wageningen, v. 48, n. 2, p. 181–198, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(00\)80013-5](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(00)80013-5). Acesso em: mar. 2026.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 14. ed. Pearson, 2013.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 11 jan. 2026.

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

BRITO, K. S. et al. Produtividade e índice de área foliar do milho em função da adubação nitrogenada. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28., 2010, Goiânia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010.

BRUAND, A.; HARTMANN, C.; LESTURGEY, G. Physical properties of tropical sandy soils: a large range of behaviours. In: *Management of tropical sandy soils for sustainable agriculture*. Khon Kaen: Thailand, 2005.

BRUNELLE, T. et al. Evaluating the impact of rising fertilizer prices on crop yields. *Agricultural Economics*, v. 46, n. 5, p. 653–666, 2015.

BUGATTI, E. Recuperação do cálcio contido em resíduos de incubatório por meio de tratamentos ácidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/2951>. Acesso em: 15 jan. 2026.

CARMO, Thayna Bezerra do. Aplicação de composto orgânico associado com subproduto de mineração para recuperação de solo. 2025. Iniciação científica — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2025.

CHAVEIRO, A. C. et al. Qualidade física e química do solo em sistema de plantio direto cultivado com hortaliças: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, e32711931564, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim logístico. Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/logistica/boletim-logistico>. Acesso em: 23 fev. 2026.

CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1301–1309, out. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000026>. Acesso em: 05 mai. 2026.

COTRIM, C. F. C. et al. Qualidade do solo: relevância e uso de indicadores para o monitoramento. *Revista Agrotecnologia*, Ipameri, v. 13, n. 2, p. 46–65, 2022.

CRUZ, J. C. et al. Cultivo do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Sistema de Produção, 2). Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/culturas_anuais/artigos/CULTIVO%20DO%20MILHO%20EMBRAPA.pdf. Acesso em: 13 jun. 2026.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M. Cultivo do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/busca-de-publicacoes/-/publicacao/490180/cultivo-do-milho>. Acesso em: 1 jun. 2026.

DALLAIRE-LAMONTAGNE, M. et al. Characterization of hatchery residues for on-farm implementation of circular waste management practices. *Waste Management*, v. 175, p. 305–314, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.010>. Acesso em: 05 mai. 2026.

DIAS, A. M. D. F. Compostagem dos resíduos de incubatório em leiras estáticas, conduzidas no verão e inverno, com ou sem aeração forçada. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Agrárias, Dourados, 2021.

DIAS, R. et al. Desempenho de um fertilizante mineral misto produzido a partir de fosfato natural sedimentar. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 5, p. 21–31, 2020.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G. et al. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 130–139.

DUARTE, J. R. et al. Produtividade e qualidade de sementes de feijão em resposta a fertilizante mineral, biofertilizante e pó de rocha. *Revista Cultura Agronômica*, v. 30, n. 1, p. 78–92, 2021.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Incubação. Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Ageitec, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/frango-de-corte/pre-producao/incubatorio/incubacao>. Acesso em: 10 jan. 2026.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Milho e Sorgo. Sistema de produção do milho. Brasília, DF: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo>. Acesso em: 16 fev. 2026.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, v. 88, p. 97–185, 2005.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Soil quality. AGROVOC, 2019. Disponível em: https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/c_a9645d28. Acesso em: 17 mar. 2026.

FAO; ITPS. Status of the world's soil resources (SWSR): main report. Rome: FAO, 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Manual prático para a compostagem de biossólidos. Londrina, 1999. 12 p.

FIALHO, L. L. et al. Interferência da lignina na quantificação de radicais livres no processo de compostagem. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 364–369, 2010.

FREITAS, L. de et al. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Unimar Ciências*, v. 26, n. 1–2, p. 8–25, 2017.

GAO, M. et al. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Bioresource Technology*, v. 78, n. 5, p. 614–619, 2010.

GOMES, J. A. et al. Adubações orgânica e mineral, produtividade do milho e características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 27, n. 3, p. 521–529, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v27i3.1472>. Acesso em: 05 mai. 2026.

HAUG, R. T. The practical handbook of compost engineering. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

HAYNES, R. J.; SWIFT, R. S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *European Journal of Soil Science*, v. 41, p. 73–83, 1990.

HERRICK, J. E. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology*, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 75–83, 2000.

HKORC – HONG KONG ORGANIC RESOURCE CENTRE. Compost and soil conditioner quality standards. Hong Kong: HKORC, 2021. Disponível em: https://hkorc-cert.org/hkorc-content/uploads/2021/06/Compost-Quality-Standard-2021_F.pdf. Acesso em: 30 mar. 2026.

HOLMGREN, G. G. S.; FLANAGAN, C. P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil material as evidenced by the crumb test. In: ASTM. Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. Philadelphia: ASTM, 1977. p. 218–239. (ASTM Special Technical Publication, n. 623).

HOSSAIN, M.; SINGH, V. P. Fertilizer use in Asian agriculture: implications for sustaining food security and the environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 57, n. 2, p. 155–169, 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa pedológico do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

ILIAN, M. A.; SALMAN, A. J. Feeding processed hatchery wastes to poultry. *Agricultural Wastes*, v. 15, p. 179–186, 1986.

IMAKUMBILI, M. L. E. Soil collection and preparation for pot experiments. 2019. Protocolo disponível em: <https://www.protocols.io/view/soil-collection-and-preparation-for-pot-experiment-2eygbfw.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO (IAC). Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 2022.

INSTRUTHERM INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. Medidor de pH de solo digital mod. PHD-3000. Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br/medidor-de-ph-de-solo-digital-mod-phd-3000>. Acesso em: 13 jan. 2026.

JUCKSCH, I. Efeito do manejo do solo sobre a matéria orgânica e agregação. 1986. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (ed.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53–72.

KIAER, L. P.; WEISBACH, A. N.; WEINER, J. Root and shoot competition: a meta-analysis. *Journal of Ecology*, v. 101, n. 5, p. 1298–1312, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12129>. Acesso em: 05 mai. 2026.

KIEHL, E. J. Fertilizantes orgânicos. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1985. 492 p.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. Piracicaba: E. J. Kiehl, 1998. 171 p.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. 4. ed. Piracicaba: E. J. Kiehl, 2004. 173 p.

KIM, E. et al. The influence of temperature and moisture contents regimes on aerobic microbial activity of a composting blend. *Bioresource Technology*, v. 86, n. 2, p. 131–137, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852402001530>. Acesso em: 18 mar. 2026.

KOBASHIGAWA, E.; MURAROLLI, R. A.; GAMEIRO, A. H. Destino de resíduos de incubatórios da avicultura no Estado de São Paulo: adequação à legislação e possibilidade de

uso econômico. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL (SOBER), 46., 2008, Rio Branco. Anais [...]. Rio Branco: SOBER, 2008.

LAL, R. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, v. 12, n. 6, p. 519–539, 2001.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W. et al. (ed.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 37–51.

LAU, A. K. et al. Aeration experiments for swine waste composting. *ScienceDirect*, v. 41, n. 2, p. 145–152, 1992.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, v. 528, p. 60–68, 2015.

LIANG, C. K.; McCLENDON, R. W. The influence of temperature and moisture content regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, v. 86, n. 2, p. 131–137, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00153-0). Acesso em: 09 mai. 2026.

LIMA, C. C. de. Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

LOCATELLI, Luís Felipe Bruno. Avaliação da mistura de pó de diabásio, folhelho e calcário dolomítico em Latossolo incubado e dinâmica da liberação de nutrientes. 2024. Dissertação (Mestrado em Geociências e Ciências Exatas) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, SP, 2024.

LOPES, Rafaela Dembiski; VEZZANI, Fabiane Machado; PARAGUAIO, Erick Vinicius. Abordagem da qualidade do solo nos trabalhos publicados no Brasil. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, p. 87–105, 2023.

MAGALHÃES, Maria do Carmo et al. Tratamento e valorização agrícola da casca de ovo. *Revista de Ciências Agrárias*, Lisboa, v. 34, n. 2, 2011.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MANTOVANI, J. R.; SPADON, F. Soil chemical properties and nutrients in maize fertilized with urban waste compost. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 47, n. 2, p. 186–194, abr./jun. 2017. Disponível em: <http://www.agro.ufg.br/pat>. Acesso em: 20 fev. 2026.

MARAGNO, E. S.; TROMBIN, D. F.; VIANA, E. O uso da serragem no processo de minicompostagem. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 4, p. 355–360, 2007.

MARTINS, G. L. et al. Differential effects of fresh and composted organic wastes on soil bacterial community and maize growth. *Applied Soil Ecology*, v. 204, p. 105715, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105715>. Acesso em: 15 maio 2026.

NEGRO, M. J. et al. Produção e gestão de composto. Informações Técnicas do Departamento de Agricultura de Zaragoza, n. 88, 2000. 32 p.

NOVAIS, R. F. et al. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

OGINO, Cristiane Mitie; GASQUES, José Garcia. Fertilizantes: dependência externa e impacto produtivo. In: VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia (org.). Agropecuária brasileira: evolução, resiliência e oportunidades. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2023. cap. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.38116/9786556350530cap5>. Acesso em: 09 mai. 2026.

OLIVEIRA, F. A. de; SILVA, J. J. S. e; CAMPOS, T. G. da S. Evapotranspiração e desenvolvimento radicular do milho irrigado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 28, n. 12, p. 1407–1415, dez. 1993.

OLIVEIRA, Lara Caroline Alves et al. Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 4, p. 1–15, 2021.

OLIVEIRA, T. G. B. de et al. Pesquisa do uso de compostagem em granjas de aves de corte localizadas na região oeste do estado do Paraná, Brasil. Brazilian Journal of Development, São José dos Pinhais, v. 10, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv10n2-026>. Acesso em: 09 mai. 2026.

OLIVEIRA, T. J. A.; DORNER, S. H.; ALMEIDA, R. E. M. A dependência do agronegócio brasileiro em relação aos fertilizantes importados. Informe GEPEC, Toledo, v. 27, n. 1, p. 1–16, 2023.

ORRICO, A. C. A. et al. Characterization and valuing of hatchery waste from the broiler chicken productive chain. Journal of Cleaner Production, v. 105, p. 520–530, 2020.

PASSIOURA, J. B. The perils of pot experiments. Functional Plant Biology, Collingwood, v. 33, n. 12, p. 1075–1079, 2006.

PEREIRA FILHO, I. A. (ed.). Cultivo do milho. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Sistema de Produção, 1). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/486917/1/Sistema-de-Producao-Cultivo-do-Milho.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2026.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais. Piracicaba: ESALQ, 2002.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 33, n. 1, 2011.

RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 284 p.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2011. 420 p.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri: Manole, 2012.

RICHARD, T. L. et al. The science and engineering of composting. Ithaca: Cornell University, 2002.

ROMANOFF, A. L.; ROMANOFF, A. J. The avian egg. New York: John Wiley & Sons, 1949.

ROSOLEM, C. A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 34, n. 5, p. 821–828, 1999.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição de soja em função da compactação do solo. Bragantia, v. 53, n. 2, p. 259–266, 1994.

SALTON, J. C. et al. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 130–139. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1095978>. Acesso em: 10 jan. 2026.

SANTOS, J. K. F. et al. Crescimento de plantas de milho submetidas à adubação NPK mineral e organomineral. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 4., 2017, Rio Verde. Instituto Federal Goiano, 2017.

SARAIVA FILHO, D. E.; BONILLA, O. H. Salinização secundária no semiárido e seus impactos no solo, na agricultura e cultivo das plantas – uma revisão. Research, Society and Development, v. 11, n. 8, e49011831298, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31298>. Acesso em: 08 mai. 2026.

SAYARA, T.; SÁNCHEZ, A.; MARCÉ, R. M. Composting of organic waste: a review on process monitoring and maturity assessment. Science of the Total Environment, Amsterdam, v. 714, 136759, 2020.

SBIZZARO, M. Vermicompostagem a partir de dejetos de ovinos e bovinos com palha de cana-de-açúcar. 2013. 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

SENGIK, P. R. Elementos essenciais no solo e nas plantas. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2003.

SEVERINO, L. S. et al. Mineralização da torta de mamona, esterco bovino e bagaço de cana estimada pela respiração microbiana. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 5, n. 1, p. 1–6, 2004.

SHOWLER, A. T. Effects of compost and chicken litter on soil nutrition, and sugarcane physiochemistry, yield, and injury caused by Mexican rice borer, *Eoreuma loftini* (Dyar) (Lepidoptera: Crambidae). Crop Protection, v. 71, p. 1–11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.01.020>. Acesso em: 08 mai. 2026.

- SINCLAIR, T. R. et al. Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. *Plant, Cell & Environment*, v. 40, n. 11, p. 2750–2759, 2017.
- SINHA, E. et al. Implication of imposing fertilizer limitations on energy, agriculture, and land systems. *Journal of Environmental Management*, v. 305, 114391, 2022.
- SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.
- STADELMAN, W. J.; COTTERILL, O. J. Egg science and technology. 4. ed. New York: The Haworth Press, 1995.
- STEVENSON, F. J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 512 p.
- STRABLE, J.; NELISSEN, H. The dynamics of maize leaf development: patterned to grow while growing a pattern. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 63, e102038, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102038>. Acesso em: 08 mai. 2026.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TERZICH, M. et al. Survey of pathogens in poultry litter in the United States. *Journal of Applied Poultry Research*, Oxford, v. 9, n. 3, p. 287–291, 2000.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v. 33, p. 141–163, 1982.
- TUOMELA, M.; VIKMAN, M.; HATAKKA, A. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, v. 72, p. 169–183, 2000.
- VALENTE, B. et al. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. *Archivos de Zootecnia*, v. 58, p. 59–85, 2009.
- VIANA, J. H. M. Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. (Comunicado Técnico, 154). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/491716/1/Com154.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- VINNERAS, B.; JONSSON, H. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method: laboratory-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, v. 84, p. 275–282, 2002.
- WANG, N. et al. Impacts of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilizers on maize yields, nutrient use efficiency, and soil nutrient balance: insights from a long-term diverse NPK omission experiment in the North China Plain. *Field Crops Research*, v. 318, e109616, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109616>. Acesso em: 08 mai. 2026.
- WEI, Z. et al. Substitution of mineral fertilizer with organic fertilizer in maize systems: a meta-analysis of reduced nitrogen and carbon emissions. *Agronomy*, v. 10, 1149, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101149>. Acesso em: 09 mai. 2026.

WENDLING, B. et al. Estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 5, p. 685–694, 2005.

WRAP – Waste and Resources Action Programme. Guidelines for the specification of quality compost for use in growing media. Banbury: WRAP, 2014. Disponível em: <https://www.wrap.ngo/resources/guide/guidelines-quality-compost-use-growing-media>. Acesso em: 30 mar. 2026.

ZHANG, L.; REN, J.; BAI, W. A review of poultry waste-to-wealth: technological progress, modeling and simulation studies, and economic-environmental and social sustainability. *Sustainability*, Basel, v. 15, 5620, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15075620>. Acesso em: 09 mai. 2026.

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. In: BORGES, A. L. (org.). *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 263–303.

APÊNDICE

APÊNDICE A – PLANILHA DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Tempo de compostagem (dias)	Data	Temp. Leira (°C)	Temp. Ambiente (°C)	Umidade Leira (%)	Umidade Relativa Ar (%)	pH	Revolvimento (Sim/Não)	Volume de água aplicado (L)
32	17/01/2026	65	29	< 20	62	7.0	Sim	15
33	18/01/2026	75	25	30 ~ 40	78	5.5	Não	0
34	19/01/2026	59	24	30 ~ 40	81	4.6	Não	0
35	20/01/2026	55	26	< 20	54	6.6	Sim	55
36	21/01/2026	78	25	> 80	63	5.2	Não	0
37	22/01/2026	85	20	60 ~ 80	97	5.3	Não	0
38	23/01/2026	77	27	30 ~ 40	66	5.2	Sim	50
39	24/01/2026	52	28	> 80	68	4.6	Sim	0
40	25/01/2026	53	30	> 80	56	4.5	Não	0
41	26/01/2026	53	29	60 ~ 80	57	4.5	Não	0
42	27/01/2026	49	29	40 ~ 65	68	5.2	Não	0
43	28/01/2026	45	29	30 ~ 40	58	4.6	Sim	5
44	29/01/2026	42	30	40 ~ 65	61	4.6	Não	0
45	30/01/2026	31	21	40 ~ 65	80	4.5	Não	0
46	31/01/2026	40	28	40 ~ 65	57	4.5	Não	0
47	01/02/2026	40	29	40 ~ 65	69	6.4	Não	0
48	02/02/2026	37	27	40 ~ 65	70	6.5	Não	0
49	03/02/2026	35	30	30 ~ 40	65	6.2	Sim	15
50	04/02/2026	36	27	40 ~ 65	81	6.0	Não	0
51	05/02/2026	36	28	40 ~ 65	69	6.5	Não	0
52	06/02/2026	35	30	30 ~ 40	58	6.7	Sim	15
53	07/02/2026	35	29	60 ~ 80	69	6.7	Não	0
54	08/02/2026	32	26	60 ~ 80	73	7.0	Não	0
55	09/02/2026	32	24	40 ~ 65	77	7.5	Não	0

56	10/02/2026	31	26	40 ~ 65	79	7.5	Não	0
57	11/02/2026	30	29	30 ~ 40	71	7.5	Sim	15
58	12/02/2026	32	31	60 ~ 80	64	8.0	Não	0
59	13/02/2026	31	30	60 ~ 80	64	7.5	Não	0
60	14/02/2026	31	29	40 ~ 65	70	7.5	Não	0
61	15/02/2026	32	32	40 ~ 65	54	7.5	Não	0
62	16/02/2026	32	32	40 ~ 65	57	7.5	Não	0
63	17/02/2026	32	32	40 ~ 65	54	7.5	Não	0
64	18/02/2026	31	31	30 ~ 40	63	7.5	Sim	15
65	19/02/2026	37	32	40 ~ 65	53	7.0	Não	0
66	20/02/2026	35	32	40 ~ 65	43	7.0	Não	0
67	21/02/2026	33	31	30 ~ 40	58	7.0	Sim	5
68	22/02/2026	37	30	40 ~ 65	65	7.0	Não	0
69	23/02/2026	35	29	40 ~ 65	64	7.0	Não	0
70	24/02/2026	36	29	30 ~ 40	70	7.0	Sim	5
71	25/02/2026	37	26	40 ~ 65	55	7.0	Não	0
72	26/02/2026	35	27	40 ~ 65	76	7.0	Não	0
73	27/02/2026	36	27	40 ~ 65	59	7.0	Não	0
74	28/02/2026	36	27	40 ~ 65	58	7.1	Não	0
75	01/03/2026	35	27	40 ~ 65	47	7.0	Não	0
76	02/03/2026	36	28	40 ~ 65	48	7.0	Não	0
77	03/03/2026	36	29	30 ~ 40	48	7.2	Sim	5
78	04/03/2026	36	30	40 ~ 65	39	7.0	Não	0
79	05/03/2026	35	30	30 ~ 40	46	7.0	Não	0
80	06/03/2026	35	30	30 ~ 40	54	7.0	Não	0

APÊNDICE B – CÁLCULOS DE SÓLIDOS E UMIDADE

Cadinho	Massa do cadinho (g)	Massa do cadinho + composto úmido (g)	Massa do cadinho + composto após secagem em estufa (g)	Massa do cadinho + composto após secagem adicional (2h) (g)	Massa do cadinho + cinzas após mufla (g)	Massa úmida da amostra (g)	Massa seca da amostra (g)	2ª Massa seca da amostra (g)	Massa remanescente após calcinação (g)	Teor de umidade (%)	Sólidos totais (%)	Sólidos Fixos (%)	Sólidos Voláteis (%)
1	64,3376	80,6181	75,4236	75,4236	70,1642	16,2805	11,086	11,086	5,8266	31,906268	68,093732	35,788827	32,304905
2	25,1227	41,5531	36,5427	36,5427	31,5849	16,4304	11,42	11,42	6,4622	30,494693	69,505307	39,330753	30,174554
3	19,7726	36,0267	30,8603	30,8603	25,6952	16,2541	11,0877	11,0877	5,9226	31,785211	68,214789	36,437576	31,777213
										Média			
										31,395391	68,604609	37,185719	31,418891

APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE NO VASO

Base seca					Volume do vaso (L)	20
Tratamento	Descrição	Solo (kg vaso ⁻¹)	Composto (kg vaso ⁻¹)	NPK (kg vaso ⁻¹)	Densidade no campo	1,54
T1	Solo (sem adubação)	27,710	0	0	Densidade no vaso	1,39
T2	Solo + Composto Orgânico	27,156	0,0554	0		
T3	Solo + 100% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	27,017	0	0,00693		
T4	Solo + Composto Orgânico + 50% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	26,809	0,0554	0,00347		
Base úmida						
Tratamento	Descrição	Solo (kg vaso ⁻¹)	Composto (kg vaso ⁻¹)	NPK (kg vaso ⁻¹)		
T1	Solo (sem adubação)	30,950	0	0		
T2	Solo + Composto Orgânico	30,220	0,0730	0		
T3	Solo + 100% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	30,260	0	0,00693		
T4	Solo + Composto Orgânico + 50% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)	29,870	0,0730	0,00347		

APÊNDICE D – CÁLCULOS COM O MÉTODO DE CRAVAÇÃO DO ANEL

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO					
(método da cravação do anel)					
Classificação: Latossolo Vermelho-Amarelo		Local: Rio Claro/SP			
		Sondagem nº: N/A		Amostra nº: 1	
Técnico do Laboratório: Alan de Oliveira		Profundidade: 0–20 cm		Data: 10/03/2026	
	Poço nº: N/A	Bloco nº: 1		C.P. nº: CP1	
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE					
Determinação nº:	1	2	3		
Cápsula nº:	40	34	38		
Sólidos+Tara+Água (g)	16,98	15,97	17,98		
Sólidos+Tara (g)	15,98	14,98	16,82		
Tara (g)	7,43	6,62	6,75		
Massa d'água (g)	1,00	0,99	1,16		
Massa de sólidos (g)	8,55	8,36	10,07		
Teor de umidade: %	11,70	11,84	11,52	Média	11,69
MASSA ESPECÍFICA NATURAL DO SOLO					
Anel nº		1	2	3	
Altura do anel	cm - H	5,1	5,13	5,1	
Diâmetro do anel	cm - D	4,95	4,98	4,95	
Área da base do anel	cm² - A	19,24	19,48	19,24	
Volume do anel	cm³ - V	98,15	99,92	98,15	
Massa do anel	g	98,04	96,41	97,41	
Massa do anel+solo úmido	g	267,11	269,68	264,72	
Massa do solo úmido	g - M	169,07	173,27	167,31	
Massa específica natural	g/cm³ - r	1,72	1,73	1,70	
Teor de umidade	% - w	11,69	11,69	11,69	
Massa específica seca	g/cm³ - r _d	1,542400486	1,55259613	1,526344267	1,542400486
Massa esp. dos sólidos	g/cm³ - p _s	2,67	2,67	2,66	
Índice de vazios	e	0,73106792	0,71970028	0,742726105	
Porosidade	% - n	42,23219155	41,8503322	42,61863657	42,23219155
Grau de Saturação	% - S _r	42,67874971	43,352859	41,85150707	

APÊNDICE E – MONITORAMENTO E CONTROLE DA UMIDADE

Controle temporal		Umidade - Solo (sem adubação)							Umidade - Solo + Composto Orgânico						
Data	Tempo (dias)	T1 -1	T1 -2	T1 -3	Média	DP	CV	Volume de água aplicado (L)	T2 - 1	T2 - 2	T2 - 3	Média	DP	CV	Volume de água aplicado (L)
13/03/2026	1	75	62	58	65,00	8,89	0,14	0	48	68	59	58,33	10,02	0,17	0
14/03/2026	2	68	75	69	70,67	3,79	0,05	0,3	60	61	61	60,67	0,58	0,01	1
15/03/2026	3	69	69	70	69,33	0,58	0,01	0	65	66	66	65,67	0,58	0,01	0
16/03/2026	4	70	72	71	71,00	1,00	0,01	0,3	55	42	48	48,33	6,51	0,13	0
17/03/2026	5	70	39	58	55,67	15,63	0,28	0	40	34	48	40,67	7,02	0,17	1
18/03/2026	6	68	68	67	67,67	0,58	0,01	0,3	68	69	68	68,33	0,58	0,01	0
19/03/2026	7	66	79	75	73,33	6,66	0,09	0	66	67	67	66,67	0,58	0,01	1
20/03/2026	8	34	59	42	45,00	12,77	0,28	0,3	65	78	75	72,67	6,81	0,09	0
21/03/2026	9	60	62	62	61,33	1,15	0,02	0	57	74	69	66,67	8,74	0,13	0
22/03/2026	10	55	58	57	56,67	1,53	0,03	0,3	64	63	64	63,67	0,58	0,01	0
23/03/2026	11	62	62	63	62,33	0,58	0,01	0	66	71	87	74,67	10,97	0,15	0
24/03/2026	12	65	64	64	64,33	0,58	0,01	0,3	54	32	34	40,00	12,17	0,30	1
25/03/2026	13	35	64	71	56,67	19,09	0,34	0	86	82	74	80,67	6,11	0,08	0
26/03/2026	14	62	62	62	62,00	0,00	0,00	0,3	66	65	66	65,67	0,58	0,01	0
27/03/2026	15	60	61	62	61,00	1,00	0,02	0	64	65	65	64,67	0,58	0,01	0
28/03/2026	16	59	59	60	59,33	0,58	0,01	0	64	63	63	63,33	0,58	0,01	1
29/03/2026	17	57	56	58	57,00	1,00	0,02	0,3	62	74	81	72,33	9,61	0,13	0
30/03/2026	18	60	59	59	59,33	0,58	0,01	0	64	64	73	67,00	5,20	0,08	0
31/03/2026	19	54	54	55	54,33	0,58	0,01	0,3	53	54	61	56,00	4,36	0,08	0
01/04/2026	20	70	71	70	70,33	0,58	0,01	0	42	57	36	45,00	10,82	0,24	1
02/04/2026	21	67	66	66	66,33	0,58	0,01	0,3	75	89	73	79,00	8,72	0,11	0
03/04/2026	22	65	64	64	64,33	0,58	0,01	0	68	58	77	67,67	9,50	0,14	0
04/04/2026	23	60	59	59	59,33	0,58	0,01	0,3	60	61	60	60,33	0,58	0,01	0,3
05/04/2026	24	55	54	54	54,33	0,58	0,01	0	58	59	59	58,67	0,58	0,01	0
06/04/2026	25	59	59	59	59,00	0,00	0,00	0,3	57	57	58	57,33	0,58	0,01	0,5
07/04/2026	26	65	66	66	65,67	0,58	0,01	0	61	60	61	60,67	0,58	0,01	0
08/04/2026	27	64	65	65	64,67	0,58	0,01	0,3	59	59	60	59,33	0,58	0,01	0
09/04/2026	28	62	62	63	62,33	0,58	0,01	0	59	58	58	58,33	0,58	0,01	0,5
10/04/2026	29	59	57	60	58,67	1,53	0,03	0	60	56	58	58,00	2,00	0,03	0
11/04/2026	30	58	56	60	58,00	2,00	0,03	0,5	58	56	58	57,33	1,15	0,02	0,5
12/04/2026	31	57	56	60	57,67	2,08	0,04	0	56	54	54	54,67	1,15	0,02	0
13/04/2026	32	55	54	58	55,67	2,08	0,04	0	55	53	54	54,00	1,00	0,02	0
14/04/2026	33	48	45	48	47,00	1,73	0,04	0,5	38	50	56	48,00	9,17	0,19	1
15/04/2026	34	67	71	59	65,67	6,11	0,09	0	60	56	58	58,00	2,00	0,03	0

16/04/2026	35	63	59	51	57,67	6,11	0,11	0,3	58	56	58	57,33	1,15	0,02	0,5
17/04/2026	36	60	58	55	57,67	2,52	0,04	0	65	70	57	64,00	6,56	0,10	0
18/04/2026	37	64	60	59	61,00	2,65	0,04	0	54	44	53	50,33	5,51	0,11	0
19/04/2026	38	58	55	51	54,67	3,51	0,06	0,5	60	58	55	57,67	2,52	0,04	0,5
20/04/2026	39	67	72	63	67,33	4,51	0,07	0	64	60	59	61,00	2,65	0,04	0
21/04/2026	40	60	66	58	61,33	4,16	0,07	0,3	58	55	51	54,67	3,51	0,06	0,3
22/04/2026	41	72	69	74	71,67	2,52	0,04	0	67	72	63	67,33	4,51	0,07	0
23/04/2026	42	75	73	68	72,00	3,61	0,05	0,3	60	66	58	61,33	4,16	0,07	0,5
24/04/2026	43	81	78	74	77,67	3,51	0,05	0	68	52	48	56,00	10,58	0,19	0
25/04/2026	44	78	62	65	68,33	8,50	0,12	0	58	56	67	60,33	5,86	0,10	0
26/04/2026	45	67	57	58	60,67	5,51	0,09	0,5	65	70	57	64,00	6,56	0,10	0,5
27/04/2026	46	74	82	79	78,33	4,04	0,05	0	75	88	82	81,67	6,51	0,08	0
28/04/2026	47	75	77	68	73,33	4,73	0,06	0	60	58	55	57,67	2,52	0,04	0
29/04/2026	48	70	68	59	65,67	5,86	0,09	0,3	64	60	59	61,00	2,65	0,04	0,5
30/04/2026	49	78	77	80	78,33	1,53	0,02	0	58	55	51	54,67	3,51	0,06	0
01/05/2026	50	75	74	68	72,33	3,79	0,05	0,5	67	72	63	67,33	4,51	0,07	0,5
02/05/2026	51	85	79	80	81,33	3,21	0,04	0	77	86	69	77,33	8,50	0,11	0
03/05/2026	52	71	69	68	69,33	1,53	0,02	0	52	54	43	49,67	5,86	0,12	0
04/05/2026	53	54	54	49	52,33	2,89	0,06	0	34	46	37	39,00	6,24	0,16	0

Controle temporal		Umidade - Solo + 100% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)							Umidade - Solo + Composto Orgânico + 50% de Fertilizante Mineral NPK (04-14-08)						
Data	Tempo (dias)	T3 - 1	T3 - 2	T3 - 3	Média	DP	CV	Volume de água aplicado (L)	T4 - 1	T4 - 2	T4 - 3	Média	DP	CV	Volume de água aplicado (L)
13/03/2026	1	82	60	72	71,33	11,02	0,15	0	63	58	54	58,33	4,51	0,08	0
14/03/2026	2	72	58	80	70,00	11,14	0,16	0,5	65	64	65	64,67	0,58	0,01	0,5
15/03/2026	3	81	69	77	75,67	6,11	0,08	0,3	66	64	66	65,33	1,15	0,02	0
16/03/2026	4	79	63	74	72,00	8,19	0,11	0,3	69	68	68	68,33	0,58	0,01	0
17/03/2026	5	76	61	71	69,33	7,64	0,11	0,3	70	69	68	69,00	1,00	0,01	0
18/03/2026	6	83	70	79	77,33	6,66	0,09	0	69	69	67	68,33	1,15	0,02	1
19/03/2026	7	75	59	69	67,67	8,08	0,12	0	70	71	73	71,33	1,53	0,02	0,5
20/03/2026	8	71	55	66	64,00	8,19	0,13	0,6	71	72	74	72,33	1,53	0,02	0
21/03/2026	9	84	72	78	78,00	6,00	0,08	0	71	72	74	72,33	1,53	0,02	0
22/03/2026	10	73	58	67	66,00	7,55	0,11	0,6	69	70	69	69,33	0,58	0,01	1
23/03/2026	11	82	69	76	75,67	6,51	0,09	0	60	64	64	62,67	2,31	0,04	0
24/03/2026	12	74	57	68	66,33	8,62	0,13	0	60	63	62	61,67	1,53	0,02	1
25/03/2026	13	70	54	64	62,67	8,08	0,13	0,3	65	65	64	64,67	0,58	0,01	0
26/03/2026	14	78	65	73	72,00	6,56	0,09	0	63	62	63	62,67	0,58	0,01	0
27/03/2026	15	69	53	63	61,67	8,08	0,13	0	64	65	64	64,33	0,58	0,01	0
28/03/2026	16	67	51	61	59,67	8,08	0,14	1	58	59	58	58,33	0,58	0,01	0
29/03/2026	17	86	73	81	80,00	6,56	0,08	0	59	58	59	58,67	0,58	0,01	1
30/03/2026	18	66	50	60	58,67	8,08	0,14	0	60	61	62	61,00	1,00	0,02	0
31/03/2026	19	64	48	58	56,67	8,08	0,14	0	57	57	58	57,33	0,58	0,01	0
01/04/2026	20	61	46	55	54,00	7,55	0,14	0,3	58	56	56	56,67	1,15	0,02	1
02/04/2026	21	74	62	69	68,33	6,03	0,09	0	55	55	58	56,00	1,73	0,03	0
03/04/2026	22	63	47	57	55,67	8,08	0,15	0	50	51	51	50,67	0,58	0,01	0
04/04/2026	23	60	45	53	52,67	7,51	0,14	0,6	55	54	54	54,33	0,58	0,01	0,5
05/04/2026	24	77	64	71	70,67	6,51	0,09	0	58	57	57	57,33	0,58	0,01	0
06/04/2026	25	62	46	56	54,67	8,08	0,15	0,6	55	56	54	55,00	1,00	0,02	1
07/04/2026	26	75	61	68	68,00	7,00	0,10	0	55	57	57	56,33	1,15	0,02	0
08/04/2026	27	59	45	52	52,00	7,00	0,13	0	55	54	56	55,00	1,00	0,02	0
09/04/2026	28	57	46	50	51,00	5,57	0,11	0	54	55	54	54,33	0,58	0,01	1
10/04/2026	29	65	52	60	59,00	6,56	0,11	0	56	57	58	57,00	1,00	0,02	0
11/04/2026	30	56	45	49	50,00	5,57	0,11	0	54	55	54	54,33	0,58	0,01	0

12/04/2026	31	54	45	47	48,67	4,73	0,10	0	54	54	54	54,00	0,00	0,00	0
13/04/2026	32	52	45	46	47,67	3,79	0,08	0	52	51	52	51,67	0,58	0,01	0
14/04/2026	33	49	45	45	46,33	2,31	0,05	0,5	49	52	62	54,33	6,81	0,13	1
15/04/2026	34	75	88	82	81,67	6,51	0,08	0	71	55	66	64,00	8,19	0,13	0
16/04/2026	35	60	58	55	57,67	2,52	0,04	0	84	72	78	78,00	6,00	0,08	0
17/04/2026	36	58	61	60	59,67	1,53	0,03	0	73	58	67	66,00	7,55	0,11	0
18/04/2026	37	58	60	68	62,00	5,29	0,09	0,3	82	69	76	75,67	6,51	0,09	0
19/04/2026	38	85	77	68	76,67	8,50	0,11	0	74	57	68	66,33	8,62	0,13	1
20/04/2026	39	54	53	54	53,67	0,58	0,01	0	70	54	64	62,67	8,08	0,13	0
21/04/2026	40	44	43	38	41,67	3,21	0,08	0,5	64	60	59	61,00	2,65	0,04	0
22/04/2026	41	82	77	80	79,67	2,52	0,03	0	58	55	51	54,67	3,51	0,06	0
23/04/2026	42	65	70	57	64,00	6,56	0,10	0,5	67	72	63	67,33	4,51	0,07	0,5
24/04/2026	43	75	88	82	81,67	6,51	0,08	0	77	86	69	77,33	8,50	0,11	0
25/04/2026	44	60	58	55	57,67	2,52	0,04	0	72	69	74	71,67	2,52	0,04	0
26/04/2026	45	64	60	59	61,00	2,65	0,04	0,5	75	73	68	72,00	3,61	0,05	0,5
27/04/2026	46	75	88	82	81,67	6,51	0,08	0	81	78	74	77,67	3,51	0,05	0
28/04/2026	47	60	58	55	57,67	2,52	0,04	0	78	62	65	68,33	8,50	0,12	0
29/04/2026	48	75	59	69	67,67	8,08	0,12	0,5	67	57	58	60,67	5,51	0,09	0,5
30/04/2026	49	53	34	48	45,00	9,85	0,22	0	74	82	79	78,33	4,04	0,05	0
01/05/2026	50	84	72	78	78,00	6,00	0,08	0,5	64	60	59	61,00	2,65	0,04	0,5
02/05/2026	51	73	58	67	66,00	7,55	0,11	0	58	55	51	54,67	3,51	0,06	0
03/05/2026	52	54	45	61	53,33	8,02	0,15	0	67	72	63	67,33	4,51	0,07	0
04/05/2026	53	37	42	49	42,67	6,03	0,14	0	44	38	56	46,00	9,17	0,20	0