

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MATEUS HENRIQUE DOS SANTOS DINIZ

**ADUBAÇÃO MINERAL E ORGANOMINERAL: INCUBAÇÃO EM SOLOS
CONTRASTANTES E RESPOSTAS DO CAFEIEIRO**

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL

2026

MATEUS HENRIQUE DOS SANTOS DINIZ

**ADUBAÇÃO MINERAL E ORGANOMINERAL: INCUBAÇÃO EM SOLOS
CONTRASTANTES E RESPOSTAS DO CAFEEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo de Camargo

Coorientadora: Raquel Pinheiro da Mota

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

D585a Diniz, Mateus Henrique dos Santos, 1994-
2026 Adubação mineral e organomineral [recurso eletrônico] : incubação
em solos contrastantes e respostas do cafeeiro / Mateus Henrique dos
Diniz. - 2026.

Orientador: Reginaldo de Camargo.

Coorientadora: Raquel Pinheiro da Mota.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.10005>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Camargo, Reginaldo de, 1972-, (Orient.). II. Mota,
Raquel Pinheiro da (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

Nelson Marcos Ferreira
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 006/2026, PPGAGRO				
Data:	Vinte e seis de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	14:30	Hora de encerramento:	17:30
Matrícula do Discente:	12213AGR014				
Nome do Discente:	Mateus Henrique dos Santos Diniz				
Título do Trabalho:	Adubação mineral e organomineral: incubação em solos contrastantes e respostas do cafeeiro				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Araújo Hulmann Batista - UFU; Beno Wendling - UFU, André Cabral França - UFVJM; Walter Luiz dos Santos Júnior - UFV; Reginaldo de Camargo - UFU orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Reginaldo de Camargo, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao(à) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Essa tese possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? (x) SIM
NÃO ()

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos,

conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo de Camargo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/03/2026, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walter Luiz dos Santos Júnior, Usuário Externo**, em 02/03/2026, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Araína Hulmann Batista, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/03/2026, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Cabral França, Usuário Externo**, em 03/03/2026, às 07:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Beno Wendling, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/03/2026, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7101241** e o código CRC **30729E8F**.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que me trouxeram a vida, amor e educação. Meus irmãos, amigos e colegas de curso, pelo apoio e a Universidade Federal de Uberlândia, por proporcionar os conhecimentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder a vida e as oportunidades vivenciadas em todas as fases do meu percurso.

Aos meus pais (*in memoriam*), pelos ensinamentos.

Aos meus irmãos, pela companhia e presença.

A Antônio e Jadir, pelo apoio na área experimental, fundamental para a realização deste estudo.

Ao meu orientador, Reginaldo de Camargo, pela orientação e dedicação.

À minha coorientadora, Raquel Pinheiro da Mota, pela parceria e contribuições valiosas.

Aos colegas, pelas leituras atentas e sugestões de melhorias.

Ao grupo de Fertilizantes Especiais da UFU, pelo suporte e colaboração.

Aos membros da banca, pela disponibilidade e pelas contribuições enriquecedoras.

Às instituições públicas: Instituto Federal de Uberlândia, pela minha formação profissional, e à Universidade Federal de Uberlândia, pelo mestrado e doutorado.

RESUMO

Esta tese reúne uma revisão e dois estudos experimentais sobre manejo nutricional de *Coffea arabica* L., relacionando processos do solo, crescimento vegetal, atividade enzimática e produção. A revisão aborda funções de nutrientes, limitações impostas por acidez, textura e capacidade de troca catiônica, além de marcadores do estado redox, com destaque para peróxido de hidrogênio (H₂O₂), peroxidação lipídica (PL) e enzimas antioxidantes. No ensaio de incubação, comparou-se um fertilizante mineral farelado (M.f.) e dois organominerais à base de esterco de frango, nas formas farelada (OM.f.) e peletizada (OM.p.) aplicados em solo arenoso e argiloso, com avaliações aos 15, 90 e 150 dias. Na fase inicial, o tipo de solo predominou sobre pH, bases trocáveis e acidez. Na fase final, a interação entre fonte e textura ficou mais evidente, com maior persistência de P e K no solo arenoso sob organominerais e melhora de atributos ligados à acidez no solo argiloso, com destaque para a formulação farelada. No experimento de campo, três fontes um fertilizante mineral convencional, um organomineral à base de esterco de frango (OMef) e outra à base de torta de filtro (OMtf) foram associadas a quatro doses de composto orgânico à base de rejeito de frango. As fontes alteraram atributos químicos do solo, modificaram o crescimento, ajustaram o sistema antioxidante e elevaram a produção da primeira colheita. OMef favoreceu maior disponibilidade inicial de P e de bases trocáveis, enquanto OMtf promoveu maior diâmetro de caule e maior emissão de ramos plagiotrópicos. Doses entre 4 e 6 t ha⁻¹ reforçaram a atividade antioxidante, e a produtividade aumentou linearmente, com acréscimo estimado de 308,3 kg ha⁻¹ de grãos por tonelada aplicada. Os resultados mostram que textura, matriz orgânica e forma física da fonte condicionam a permanência dos nutrientes, o ajuste do estado redox e o desempenho inicial da lavoura.

Palavras-chave: Manejo nutricional. Fósforo disponível. Resposta antioxidante. Arquitetura vegetal. Resíduos agroindustriais. Ciclagem de nutrientes.

ABSTRACT

This thesis comprises a review and two experimental studies on nutrient management in *Coffea arabica* L., relating soil processes, plant growth, enzymatic activity, and yield. The review addresses nutrient functions, constraints imposed by acidity, texture, and cation exchange capacity, and redox markers, with emphasis on hydrogen peroxide (H₂O₂), lipid peroxidation (PL), and antioxidant enzymes. In the incubation assay, one powdered mineral fertilizer (M.f.) and two poultry-litter organominerals, one powdered (OM.f.) and one pelletized (OM.p.), were applied to sandy and clayey soils and evaluated at 15, 90, and 150 days. In the initial phase, soil type was the main factor affecting pH, exchangeable bases, and acidity. In the final phase, the interaction between source and texture became more evident, with greater P and K persistence in the sandy soil under organominerals and improvement of acidity-related attributes in the clayey soil, mainly under the powdered formulation. In the field experiment, three sources, one conventional mineral fertilizer, one poultry-manure organomineral (OMef), and one filter-cake organomineral (OMtf), were combined with four rates of an organic compound based on poultry waste. These sources altered soil chemical attributes, modified plant growth, adjusted the antioxidant system, and increased first-harvest yield. OMef promoted greater initial availability of P and exchangeable bases, whereas OMtf increased stem diameter and the emission of plagiotropic branches. Rates between 4 and 6 t ha⁻¹ strengthened antioxidant activity, and yield increased linearly, with an estimated gain of 308.3 kg ha⁻¹ of coffee beans per ton applied. Overall, the results show that soil texture, organic matrix, and fertilizer physical form control nutrient persistence, redox adjustment, and early crop performance.

Keywords: Nutrient management. Phosphorus availability. Antioxidant response. Plant architecture. Agro-industrial residues. nutrient cycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Instalação do experimento e aplicação localizada dos fertilizantes.....	40
Figura 2 - Cobertura dos vasos para controle hídrico e redução da evaporação.....	41
Figura 3 - Localização do experimento no município de Indianópolis, Minas Gerais.....	69
Figura 4 - P no solo (Mehlich-1).....	76
Figura 5 - Ca, SB e V vs. dose (OMef).....	77
Figura 6 - Altura de planta e ramos plagiotrópicos aos 3 MPP.....	79
Figura 7 - Diâmetro de caule aos 3 e 12 MPP.....	80
Figura 8 - Peroxidase, peróxido de hidrogênio, superóxido dismutase e catalase sob a fonte mineral.....	83
Figura 9 - Catalase e peroxidação lipídica sob OMef.....	83
Figura 10 - Peroxidase, peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio sob OMtf.....	84
Figura 11 - Produtividade de grãos de café em função da dose do fertilizante orgânico.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fenologia do cafeeiro arábica e janelas de manejo.....	22
Tabela 2 - Composição dos fertilizantes organominerais à base de esterco de frango (OMef) e fertilizante mineral.....	38
Tabela 3 - Composição da matriz de esterco de frango.....	39
Tabela 4 - Propriedades dos solos estudados (Neo e Lato).....	39
Tabela 5 - ANAVA (teste F) de atributos químicos do solo (15, 90 e 150 DAAF).....	43
Tabela 6 - Atributos químicos do solo aos 15, 90 e 150 DAAF em Neo e Lato sob M.f, OM.f e OM.p.....	45
Tabela 7 - Propriedades físicas e químicas do solo em duas profundidades.....	70
Tabela 8 - Composição dos fertilizantes organominerais (OM) e fertilizante mineral.....	71
Tabela 9 - Composição química das matrizes orgânicas dos fertilizantes.....	71
Tabela 10 - Análise de variância, estatística de Fisher calculada Fc, de variáveis químicas do solo aos 3 meses após o plantio do cafeeiro.....	76
Tabela 11 - Ca ²⁺ , SB e V por dose (Mineral e OMtf).....	78
Tabela 12 - Análise de variância (estatística de Fisher calculada = Fc) das variáveis biométricas aos 3 e 12 MPP.....	78
Tabela 13 - Ramos plagiotrópicos aos 3 MPP e diâmetro de caule aos 12 MPP.....	80
Tabela 14 - Diâmetro de copa aos 3 MPP, altura de planta e ramos plagiotrópicos aos 12 MPP.	81
Tabela 15 - Análise de variância (estatística de Fisher calculada = Fc) de variáveis bioquímicas 31 MPP.....	81
Tabela 16 - Respostas bioquímicas por fonte e dose.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
PL	Peroxidação lipídica
M.f	Fertilizante mineral convencional farelado
OM.f	Fertilizante organomineral à base de esterco de frango farelado
OM.p	Fertilizante organomineral à base de esterco de frango peletizado
P	Fósforo
K	Potássio
OMef	Fertilizante organomineral à base de esterco de frango
OMtf	Fertilizante organomineral à base de torta de filtro
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
CTC	Capacidade de troca catiônica
SOD	Superóxido dismutase
CAT	Catalase
H ₂ O	Água
POD	Peroxidase
O	Oxigênio
Fe	Ferro
N	Nitrogênio
C	Carbono
H	Hidrogênio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
S	Enxofre
B	Boro
Cl	Cloro
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Zn	Zinco
NO ₃ ⁻	Nitrato
ATP	Trifosfato de adenosina
PSII	Fotossistema II

MAPA Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NH₃ Amônia

SDA Secretaria de Defesa Agropecuária

C/N Relação carbono nitrogênio

PST Proteínas solúveis totais

11S Globulina de reserva 11S

ERO Espécies reativas de oxigênio

APX Ascorbato peroxidase

IAC Instituto Agronômico de Campinas

MDA Malondialdeído

Ca²⁺ Íon cálcio

Neo Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, textura arenosa

Lato Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa

m Saturação por alumínio

DAAF Dias após aplicação dos fertilizantes

CaCl₂ Cloreto de cálcio

S-SO₄²⁻ Enxofre na forma sulfato

Al³⁺ Alumínio trocável

H⁺+Al³⁺ Acidez potencial

Aw Tipo climático Aw da classificação de Köppen

P₂O₅ Pentóxido de fósforo

K₂O Óxido de potássio

COT Carbono orgânico total

v/v Proporção volume por volume

UV-Vis Espectrofotometria ultravioleta visível

AOAC Association of Official Analytical Chemists

MO Matéria orgânica do solo

SB Soma de bases

T Capacidade de troca catiônica a pH 7,0

V Saturação por bases

KCl Cloreto de potássio

DTPA Ácido dietilenotriaminopenta-acético

TEA Trietanolamina

ANAVA Análise de variância

g.l. Graus de liberdade
CV Coeficiente de variação
MPP Meses após o plantio
cv. Cultivar
LAMAS Laboratório de Manejo do Solo
MG Minas Gerais
L.Q. Limite de quantificação
NBT *Nitroblue tetrazolium*
EDTA Ácido etilenodiamino tetra-acético
TBARS Substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico
Fc Estatística F calculada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Nutrição do cafeeiro e dinâmica de fertilizantes: aspectos fisiológicos, bioquímicos e edáficos em sistemas tropicais.....	17
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 Fenologia na implantação e funções dos nutrientes no cafeeiro.....	22
2.2 Solo tropical, retenção de nutrientes e riscos de perdas.....	23
2.3 Fertilizantes, tecnologias, forma física e regulação.....	24
2.4 Respostas fisiológicas e bioquímicas ligadas ao balanço redox.....	25
2.5 Considerações e justificativas.....	26
REFERÊNCIAS.....	28
CAPÍTULO 2 - Dinâmica e efeito residual de fertilizantes minerais e organominerais em solos do Cerrado de texturas contrastantes.....	34
RESUMO.....	34
ABSTRACT.....	35
1 INTRODUÇÃO.....	37
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
2.1 Caracterização da área experimental.....	38
2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	38
2.3 Matriz orgânica utilizada na formulação organomineral.....	39
2.4 Solos estudados, preparo das unidades experimentais e instalação.....	39
2.5 Aplicação dos fertilizantes e manejo hídrico.....	41
2.6 Análise de solo.....	42
2.7 Análise estatística.....	42
3 RESULTADOS.....	43
3.1 ANAVA e teste de médias.....	43
3.1.1 Potencial hidrogeniônico em solução de cloreto de cálcio - pH CaCl ₂	48
3.1.2 Fósforo extraível por Mehlich-1 - P Mehlich-1.....	48
3.1.3 Potássio disponível - K ⁺	48
3.1.4 Cálcio e magnésio trocáveis - Ca ²⁺ , Mg ²⁺	49
3.1.5 Enxofre disponível na forma sulfato - S SO ₄ ²⁻	49
3.1.6 Soma de bases e saturação por bases - SB e V.....	50
3.1.7 Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 - T.....	50
3.1.8 Alumínio trocável, acidez potencial e saturação por alumínio - Al ³⁺ , H ⁺ +Al ³⁺ e m.....	50
3.1.9 Matéria orgânica do solo - MO.....	51
3.1.10 Micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco - B, Cu, Fe, Mn e Zn.	51
4 DISCUSSÃO.....	52

4.1	Potencial hidrogeniônico em solução de cloreto de cálcio - pH CaCl ₂	53
4.2	Fósforo extraível pelo extrator Mehlich-1 - P Mehlich-1.....	54
4.3	Potássio trocável - K ⁺	55
4.4	Cálcio e magnésio trocáveis - Ca ²⁺ e Mg ²⁺	55
4.5	Enxofre disponível na forma sulfato - S SO ₄ ²⁻	56
4.6	Soma de bases e saturação por bases - SB e V.....	56
4.7	Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 - T.....	57
4.8	Alumínio trocável, acidez potencial e saturação por alumínio - Al ³⁺ , H ⁺ +Al ³⁺ e m.. 57	
4.9	Matéria orgânica do solo - MO.....	58
4.10	Micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco - B, Cu, Fe, Mn e Zn.....	58
4.11	Implicações agronômicas.....	59
5	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61
	CAPÍTULO 3 - Efeitos de fertilizantes organominerais e minerais na fertilidade do solo, desempenho biométrico, atividade enzimática e produtividade do cafeeiro.....	65
	RESUMO.....	66
	ABSTRACT.....	67
1	INTRODUÇÃO.....	68
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
2.1	Caracterização da área experimental e cultivar.....	69
2.2	Delineamento experimental.....	70
2.3	Manejo da safra.....	72
2.4	Metodologias.....	72
2.4.1	Análise de solo.....	72
2.4.2	Características biométricas das plantas.....	72
2.4.3	Componentes biológicos e antioxidantes bioativos.....	73
2.4.4	Proteínas solúveis totais - PST.....	73
2.4.5	Peroxidase - POD.....	73
2.4.6	Catalase - CAT.....	74
2.4.7	Superóxido Dismutase - SOD.....	74
2.4.8	Peroxidação lipídica - PL.....	74
2.4.9	Peróxido de hidrogênio - H ₂ O ₂	74
2.4.10	Produtividade.....	75
2.4.11	Análise estatística.....	75
3	RESULTADOS.....	75
3.1.1	Variáveis químicas do solo.....	75
3.1.2	Variáveis biométricas do cafeeiro.....	78
3.1.3	Variáveis bioquímicas do cafeeiro.....	81
3.1.4	Variável de produtividade.....	85
4	DISCUSSÃO.....	86
4.1	Variáveis de solo.....	86

4.2 Variáveis biométricas.....	87
4.3 Variáveis bioquímicas.....	88
4.4 Produtividade do café.....	89
5 CONCLUSÕES.....	91
REFERÊNCIAS.....	92

CAPÍTULO 1

Nutrição do cafeeiro e dinâmica de fertilizantes: aspectos fisiológicos, bioquímicos e edáficos em sistemas tropicais

RESUMO

A implantação do cafeeiro define o crescimento vegetativo inicial, a formação de gemas e a consolidação do sistema radicular, com reflexo no desempenho do ciclo produtivo. A adubação nessa fase exige ajuste de fonte, dose, época e posicionamento para alinhar a oferta de nutrientes à fenologia e às condições do solo. Em ambientes tropicais, acidez, capacidade de troca catiônica e textura condicionam retenção de cátions, disponibilidade de fósforo e risco de perdas por deslocamento no perfil, o que altera a eficiência de aproveitamento dos insumos. O capítulo organiza as funções nutricionais na fase inicial, descreve processos do solo que controlam disponibilidade e perdas, compara fontes minerais, orgânicas e organominerais quanto à liberação de nutrientes e à influência da forma física, e apresenta o enquadramento normativo brasileiro aplicável ao registro e às garantias de qualidade, conectando dinâmica de nutrientes, ambiente radicular e critérios técnicos de uso em sistemas cafeeiros.

Palavras-chave: eficiência de uso de nutrientes. liberação controlada; capacidade de troca catiônica; acidez potencial; estresse oxidativo.

ABSTRACT

The establishment phase defines early vegetative growth, bud formation, and the consolidation of the root system, shaping crop performance across subsequent production cycles. Nutrient management at this stage requires the adjustment of source, rate, timing, and placement to align nutrient supply with phenological demand and soil conditions. In tropical environments, acidity, cation exchange capacity, and texture govern cation retention, phosphorus availability, and the risk of downward movement in the soil profile, which affects nutrient recovery from inputs. This chapter organizes nutrient functions during early development, describes soil processes that control availability and losses, compares mineral, organic, and organomineral sources in terms of nutrient release and the role of physical form, and presents the Brazilian standards that define registration and quality guarantees, linking nutrient dynamics, the root-zone environment, and technical criteria for use in production systems.

Keywords: nutrient use efficiency; controlled release; cation exchange capacity; potential acidity; oxidative stress.

1 INTRODUÇÃO

A implantação de *Coffea arabica* L. define a arquitetura do sistema radicular e do dossel e condiciona o desempenho do primeiro ciclo produtivo. O manejo de adubação no plantio integra análise de solo, posicionamento do fertilizante e época de aplicação para sustentar crescimento inicial e indução de estruturas reprodutivas (Sakiyama *et al.*, 2015).

Em condições tropicais brasileiras, a fenologia organiza o ciclo do cafeeiro em fases vegetativas, reprodutivas e de repouso. Cada fase apresenta exigências distintas de recursos, o que orienta a definição de janelas de manejo (Camargo; Camargo, 2001; Meireles *et al.*, 2009).

Entre os macronutrientes, nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) apresentam alta demanda e influenciam expansão foliar, emissão de ramos, condutância estomática e transporte de fotoassimilados, com efeito direto no vigor vegetativo (Malavolta, 1980; Marschner, 2012).

O fósforo (P) integra o metabolismo energético via trifosfato de adenosina (ATP) e participa do equilíbrio de fosfato inorgânico (Pi), o que sustenta formação e atividade de raízes em fase jovem. A eficiência do P depende de fonte, dose e posicionamento, com impacto na nutrição ao longo do desenvolvimento (Taiz *et al.*, 2017; Dutra *et al.*, 2025).

Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) contribuem para a integridade de membranas, estabilidade de parede celular e fotossíntese. Em mudas, a eficiência de absorção e translocação desses nutrientes se relaciona ao desempenho após o transplante e ao crescimento no primeiro ano (Tomaz *et al.*, 2003; Marschner, 2012).

Enxofre (S) compõe aminoácidos sulfurados e coenzimas, conectando a nutrição a processos metabólicos e qualidade do tecido vegetal. O ajuste de reposição de nutrientes exige leitura do solo e calibração de manejo para o ambiente de cultivo (Malavolta, 1980; Ribeiro *et al.*, 1999).

A capacidade de troca catiônica (CTC) expressa a retenção de cátions no solo e orienta recomendações de correção e adubação, com impacto na estabilidade do suprimento ao longo do ciclo. Em solos tropicais, a construção de fertilidade depende de calagem e de estratégias de aplicação coerentes com textura e matéria orgânica (Ribeiro *et al.*, 1999).

Em Latossolos, a imobilização do fósforo se associa a óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), o que reduz a atividade do nutriente em solução e exige estratégia de fonte e posicionamento. Esse processo limita a eficiência de adubação fosfatada em ambientes ácidos (Fageria; Barbosa Filho, 1987; Sousa *et al.*, 2025).

Fontes minerais apresentam alta solubilidade, enquanto fontes orgânicas aportam carbono e influenciam atributos físicos e biológicos do solo. Formulações organominerais combinam matriz orgânica e frações minerais em uma formulação, integrando efeito residual e liberação distribuída no tempo, com resposta dependente do tipo de resíduo e do solo (Abdulraheem *et al.*, 2023; Moreira *et al.*, 2021; Pavinato *et al.*, 2020; Uddin *et al.*, 2025).

Tecnologias associadas ao insumo, como controle de liberação e aditivos para reduzir perdas, elevam eficiência de uso de nitrogênio e reduzem a volatilização de amônia. Para fósforo, estratégias com combinação de fontes convencionais e produtos de liberação controlada mantêm oferta ao longo do desenvolvimento e sustentam ganhos de nutrição (Freitas *et al.*, 2023; Sarkis *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2023; Dutra *et al.*, 2025).

O marco normativo brasileiro define registro, garantias, rotulagem e fiscalização, com regras específicas para produtos minerais, orgânicos e organominerais. Esse enquadramento inclui a Lei nº 6.894/1980, o Decreto nº 4.954/2004 e instruções normativas que detalham especificações e critérios de fiscalização (Brasil, 1980; Brasil, 2004; Brasil, 2009; Brasil, 2013; Brasil, 2020).

A interpretação de respostas agronômicas ganha robustez quando conecta crescimento e nutrição a indicadores fisiológicos e bioquímicos. Em estresses abióticos, ocorre acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), com destaque para peróxido de hidrogênio (H₂O₂), e ativação de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD), com efeito sobre o controle do dano oxidativo (Taiz *et al.*, 2017).

Outros componentes usados ao longo da tese incluem catalase (CAT), peroxidase (POD) e malondialdeído (MDA), este como indicador de peroxidação lipídica. A leitura desses marcadores, em conjunto com variáveis de solo e nutrição, sustenta a interpretação dos resultados experimentais (Taiz *et al.*, 2017).

Com base nesses fundamentos, o capítulo estrutura a discussão sobre fenologia, funções de nutrientes, reatividade do solo, tecnologias associadas ao insumo e critérios normativos, criando base conceitual para os capítulos seguintes (Ribeiro *et al.*, 1999; Camargo; Camargo, 2001; Abdulraheem *et al.*, 2023).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fenologia na implantação e funções dos nutrientes no cafeeiro

A implantação do cafeeiro define vigor inicial e a base estrutural que sustenta o potencial produtivo. O manejo nutricional acompanha a fenologia, pois a demanda muda entre fases vegetativas e reprodutivas. A Tabela 1 sintetiza janelas fenológicas que orientam esse ajuste, separando estrutura vegetativa, florada, expansão de frutos, maturação e senescência de ramos.

Tabela 1 - Fenologia do cafeeiro arábica e janelas de manejo.

Ano Fenológico	Fase	Descrição	Período	Categoria
1º Ano	1ª Fase	Formação de gemas foliares	Set - Mar	Vegetativo
	2ª Fase	Maturação de gemas florais	Abr - Mai	Repouso
	3ª Fase	Florada	Jun - Ago	Vegetativo
2º Ano	4ª Fase	Expansão dos frutos	Set - Jan	Reprodutivo
	5ª Fase	Maturação dos frutos	Fev - Jun	Reprodutivo
	6ª Fase	Senescência dos ramos	Jul - Ago	Autopoda

Fonte: adaptado de Camargo e Camargo (2001); Meireles et al., (2009) para condições tropicais brasileiras.

Entre os macronutrientes de maior demanda, nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) regulam processos centrais do estabelecimento. O N sustenta proteínas, clorofila e ácidos nucleicos, com efeito sobre fotossíntese e crescimento vegetativo. O P atua no metabolismo energético e na expansão radicular. O K regula controle estomático, potencial osmótico e transporte de fotoassimilados, com efeito sobre enchimento de frutos e tolerância ao déficit hídrico (Marschner, 2012; Taiz *et al.*, 2017).

O suprimento de N influencia a emissão de ramos e folhas e altera o balanço hormonal por estímulo a citocininas, o que se reflete na formação de estruturas produtivas. Em solos com baixa capacidade de retenção, o manejo do N exige calendário de aplicação alinhado ao crescimento e chuva para manter oferta estável às raízes (Camargo; Camargo, 2001; Bortolotto *et al.*, 2015).

O P sustenta rotas energéticas via trifosfato de adenosina (ATP) e participa da dinâmica de fosfato inorgânico (Pi), com impacto na divisão celular e no crescimento do sistema radicular. Essa função ganha relevo na implantação e no início da frutificação, quando o volume de solo explorado ainda é limitado e a eficiência depende de contato entre raiz ativa e nutriente disponível (Hinsinger, 2001; Khan *et al.*, 2023).

Entre os macronutrientes de suporte estrutural e metabólico, cálcio (Ca) atua em parede celular e sinalização, com efeito sobre integridade tecidual e crescimento radicular. Magnésio (Mg) integra a clorofila e participa das trocas gasosas e do metabolismo de carboidratos, com reflexo no desempenho fotossintético do cafeeiro (Ramalho *et al.*, 1995; Dias *et al.*, 2017). Enxofre (S) integra cisteína e metionina e participa de compostos associados ao metabolismo redox, conectando nutrição, defesa e síntese proteica (Droux, 2004; Kopriva *et al.*, 2019).

No conjunto de micronutrientes, ferro (Fe) participa do transporte de elétrons em fotossíntese e respiração e influencia formação de pigmentos. Manganês (Mn) integra reações fotossintéticas associadas ao fotossistema II (PSII) e participa de enzimas ligadas ao metabolismo de carboidratos, o que explica a sensibilidade do cafeeiro a desequilíbrios em solos ácidos (Bragança *et al.*, 2007; Connorton *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 2019).

Zinco (Zn) participa da síntese de auxinas, estabilidade proteica e funcionamento de enzimas redox, com relevância em tecidos jovens e na brotação. Boro (B) atua em parede celular, divisão celular em meristemas e processos reprodutivos. Cobre (Cu) integra proteínas do metabolismo oxidativo e contribui para defesa antioxidante, o que conecta micronutrição e tolerância a estresses (Pedrosa *et al.*, 2013; Bell; Dell, 2008; Costa, 2024).

Molibdênio (Mo) atua como cofator em enzimas do metabolismo do N, influenciando o aproveitamento de formas nitrogenadas pela planta. Cloro (Cl) participa do balanço iônico e integra funções fotoquímicas, o que sustenta sua classificação como micronutriente essencial em plantas superiores (Hänsch *et al.*, 2009; Marschner, 2012).

2.2 Solo tropical, retenção de nutrientes e riscos de perdas

Em solos tropicais intemperizados, a eficiência da adubação depende de textura, mineralogia e poder tampão. A capacidade de troca catiônica (CTC) expressa a aptidão do solo para reter cátions no complexo sortivo, reduzindo oscilações de concentração na solução do solo após chuva ou irrigação. Em solos arenosos, a baixa CTC amplia a variabilidade do suprimento e eleva a dependência de parcelamento e posicionamento cuidadoso (Ribeiro *et al.*, 1999; Sparks, 2019).

A leitura de fertilidade usa indicadores que sintetizam a ocupação do complexo de troca. Soma de bases (SB) e saturação por bases (V) descrevem o estoque e a proporção de cátions básicos retidos, com relação direta com a estabilidade química do ambiente radicular. Em solos argilosos, a retenção sustenta SB e V mais elevadas; em solos arenosos, perdas por

percolação reduzem a permanência de bases e elevam a dependência de reposição fracionada (Rosolem; Steiner, 2017; Sparks, 2019).

A acidez do solo altera disponibilidade de nutrientes e crescimento radicular por aumento do alumínio trocável (Al^{3+}) e por elevação da acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$). A correção da acidez eleva V, reduz atividade de Al^{3+} e melhora o ambiente químico para raízes, com reflexo sobre absorção e desenvolvimento inicial do cafeeiro (Ribeiro *et al.*, 1999; Sparks, 2019).

A dinâmica do fósforo em solos tropicais é marcada por retenção em óxidos de ferro e alumínio, o que reduz a fração em solução. Esse mecanismo sustenta práticas como aplicação localizada e uso de fontes com liberação mais distribuída para elevar a chance de intercepção radicular antes da imobilização (Espinoza *et al.*, 2023; Siman *et al.*, 2024; Dutra *et al.*, 2025).

Em solos arenosos, o risco dominante recai sobre perdas por lixiviação de N e K, intensificadas por chuva ou irrigação após aplicação. A lixiviação de nitrato (NO_3^-) tem registro em café sob fertirrigação, o que reforça a necessidade de sincronizar oferta e demanda ao longo do ciclo (Bortolotto *et al.*, 2015; Mota *et al.*, 2023).

A textura também altera o microambiente reacional no ponto de aplicação, com efeito sobre pulso de solubilização e condutividade elétrica (CE) local. Em partículas finas, ocorre dissolução mais rápida e maior CE, o que amplia risco de perdas em solos de alta percolação e acelera adsorção de P em solos com maior teor de argila e óxidos (Barbosa *et al.*, 2024; Sobreira *et al.*, 2024).

2.3 Fertilizantes, tecnologias, forma física e regulação

Fertilizantes minerais fornecem nutrientes em formas de alta solubilidade e resposta rápida. Em rótulos, o teor de fósforo é expresso como pentóxido de fósforo (P_2O_5) e o teor de potássio como óxido de potássio (K_2O), o que padroniza garantias comerciais. O manejo do mineral exige alinhamento entre dose e risco de perdas, com parcelamento em solos de baixa retenção e aplicação localizada para elevar o aproveitamento na implantação (Ribeiro *et al.*, 1999; Brasil, 2013).

A rota do N concentra pontos de ineficiência ligados a volatilização e transformações no solo. Tecnologias que combinam liberação controlada e inibidor de urease, como N-(n-butil) triamida tiofosfórica (NBPT), reduzem emissões de amônia (NH_3) e elevam eficiência em ambientes cafeeiros avaliados. Esse ganho também repercute no perfil de

ciclagem do N no solo e em atributos microbiológicos associados ao nutriente (Freitas *et al.*, 2023; Sarkis *et al.*, 2023).

Fertilizantes orgânicos entregam nutrientes associados à matéria orgânica e liberam frações por mineralização. A relação carbono/nitrogênio (C/N) do material regula imobilização e velocidade de disponibilização, o que exige controle de maturidade do composto e monitoramento de qualidade para reduzir risco de fitotoxicidade e variação entre lotes (Brasil, 2020; EMBRAPA, 2025). Em sistemas irrigados há relatos de viabilidade agrônômica com o uso de fontes orgânicas, desde que o manejo assegure a continuidade do suprimento ao longo do ciclo (Fernandes *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2021).

Fertilizantes organominerais associam matéria orgânica estabilizada e nutrientes minerais em uma mesma formulação. A fração mineral sustenta a demanda inicial e a fração orgânica contribui para retenção de água, formação de agregados e aumento funcional da CTC, o que favorece a permanência de nutrientes na zona radicular. O desempenho varia com tipo de resíduo, tecnologia de fabricação e classe de solo, com registros de melhora em atributos químicos e em crescimento do cafeeiro em condições estudadas (Zonta *et al.*, 2021; Abdulraheem *et al.*, 2023; Mota *et al.*, 2023).

A forma física do fertilizante altera dissolução, distribuição no sulco e logística de aplicação. Pellets e grânulos prolongam liberação e reduzem deslocamento em solos de alta percolação, mantendo compatibilidade com aplicação mecanizada. A granulometria também interfere em armazenamento, poeira, empedramento e uniformidade de distribuição no talhão, com impacto direto no custo operacional (Rodrigues *et al.*, 2021; Erenoglu *et al.*, 2023; Sakrabani *et al.*, 2024).

No Brasil, a produção e o comércio seguem a Lei nº 6.894/1980 e o Decreto nº 4.954/2004, com diretrizes complementares na Instrução Normativa do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) nº 53/2013. Para orgânicos e organominerais, a Instrução Normativa SDA nº 61/2020 define critérios de classificação, garantias, rotulagem e limites de contaminantes, elevando padronização e segurança de uso (Brasil, 1980; Brasil, 2004; Brasil, 2013; Brasil, 2020).

2.4 Respostas fisiológicas e bioquímicas ligadas ao balanço redox

O suprimento de nutrientes altera o metabolismo do cafeeiro e interfere no equilíbrio entre geração e remoção de espécies reativas de oxigênio (EROs). Em condição de desequilíbrio nutricional, a planta eleva rotas de proteção e ajusta o sistema antioxidante, com

reflexo em fotossíntese, integridade de membranas e crescimento (Reis *et al.*, 2015; Biswas *et al.*, 2020).

As proteínas solúveis totais (PST) refletem síntese, armazenamento e mobilização de compostos nitrogenados. Em grãos verdes, há registro de participação relevante da globulina 11S na fração proteica solúvel, conectando nutrição, constituição do grão e atributos de qualidade. Em estresse hídrico ou térmico, a PST registra reorganização metabólica, com variação entre genótipos (Acuña *et al.*, 2002; Cheng *et al.*, 2018; Rawel; Sagu, 2023).

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) atua como sinal redox em concentrações controladas e, em excesso, intensifica dano oxidativo. Em cafeeiro, há evidências de que ácido ascórbico e H_2O_2 alteram movimento estomático e atividade de enzimas do sistema antioxidante, o que reforça o uso desse indicador na leitura fisiológica de respostas ao manejo (Deuner *et al.*, 2007; Deuner *et al.*, 2008).

A superóxido dismutase (SOD) converte radicais superóxido em formas menos reativas e inicia a rota de controle de oxidantes. A atividade de SOD se conecta ao estado nutricional, pois isoformas enzimáticas dependem de micronutrientes como cofatores, o que liga disponibilidade no solo, absorção e capacidade antioxidante do tecido foliar (Abreu; Cabelli, 2010; López-Velázquez *et al.*, 2021).

A catalase (CAT) decompõe peróxido de hidrogênio e atua em compartimentos de alta geração de oxidantes. A peroxidase (POD) consome peróxido de hidrogênio ao oxidar compostos fenólicos e participa de processos de lignificação e defesa, integrando controle redox e ajustes estruturais em folhas (Deuner *et al.*, 2008; Ramalho *et al.*, 2025).

A peroxidação lipídica (PL) expressa dano de membranas por oxidação de ácidos graxos, e o malondialdeído (MDA) é usado como marcador desse processo. Em manejo nutricional, queda de PL e de MDA indica maior eficiência do sistema antioxidante e menor pressão oxidativa, o que amplia a consistência fisiológica do cafeeiro sob estresses edafoclimáticos (Zhang *et al.*, 2021; Gupta *et al.*, 2024).

2.5 Considerações e justificativas

Com esses fundamentos, a tese avalia o comportamento temporal de atributos químicos do solo após aplicação de fertilizante mineral e fertilizantes organominerais em duas formas físicas, farelada e peletizada, comparando solos tropicais de textura contrastante. O desenho integra indicadores de acidez, bases e disponibilidade de nutrientes para sustentar escolhas de fonte e forma física, com foco em permanência de nutrientes no perfil superficial,

risco de perdas e qualidade química do ambiente radicular (Benites *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2023; Uddin *et al.*, 2024).

REFERÊNCIAS

- ABDULRAHEEM, M. I.; HU, J.; AHMED, S.; LI, L.; NAQVI, S. M. Z. A. Advances in the use of organic and organomineral fertilizers in sustainable agricultural production. In: HAKEEM, K. R. (ed.). **Organic fertilizers: new advances and applications**. London: IntechOpen, 2023. p. 1-20. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001465>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- ABREU, I. A.; CABELLI, D. E. Superoxide dismutases: a review of the metal-associated mechanistic variations. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA): Proteins and Proteomics**, v. 1804, n. 2, p. 263-274, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2009.11.005>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- ACUÑA, R.; BASSÜNER, R.; BEILINSON, V.; CORTINA, H.; CADENA-GÓMEZ, G.; MONTES, V.; NIELSEN, N. C. Coffee seeds contain 11S storage proteins. **Physiologia Plantarum**, v. 105, n. 1, p. 122-131, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105119.x>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- AL-TEMIMI, A.; AL-GHRAIRI, S.; AL-GHRAIRI, F.; RAZAQ, I. Effect of potassium and micronutrient fertilization on the activity of catalase and yield of wheat grown in saline conditions. **DYSONA: Applied Science**, v. 1, n. 3, p. 81-87, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.30493/das.2020.239977>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BARBOSA, N. S.; LUZ, M. S. da; SOUSA, N. G.; SANTOS, K. G. dos. Development and evaluation of slow-release organomineral phosphate fertilizer based on coffee waste. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 48, e018323, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202448018323>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BELL, R. W.; DELL, B. **Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy production**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2008. 195 p. ISBN 978-2-9523139-3-3. Disponível em: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2008_IFA_micronutrients.pdf. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BISWAS, K.; ADHIKARI, S.; TARAFDAR, A.; KUMAR, R.; SAHA, S.; GHOSH, P. Reactive oxygen species and antioxidant defence systems in plants: role and crosstalk under biotic stress. In: ROYCHOWDHURY, R.; CHOUDHURY, S.; HASANUZZAMAN, M.; SRIVASTAVA, S. (ed.). **Sustainable agriculture in the era of climate change**. Cham: Springer, 2020. p. 265-292. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45669-6_12. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BORTOLOTTTO, R. P.; BRUNO, I. P.; DOURADO-NETO, D.; TIMM, L. C.; SILVA, A. N. da; REICHARDT, K. Lixiviação de nitrato por meio do balanço hídrico climatológico na cultura de café fertirrigada. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 6, p. 785-792, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000600006>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BRAGANÇA, S. M.; MARTINEZ, H. E. P.; LEITE, H. G.; SANTOS, L. P.; SEDIYAMA, C. S.; ALVAREZ V., V. H.; LANI, J. A. Acúmulo de B, Cu, Fe, Mn e Zn pelo cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 54, n. 314, p. 398-404, 2007. Disponível em: <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/3382>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1980. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-6894-16-dezembro-1980-371561-norma-atualizada-pl.html>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Aprova o regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. Brasília, DF: Presidência da República, 2004. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/decreto-4954-2004-com-alteracoes-do-dec-8384-2014-planalto.pdf/view>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa MAPA nº 53, de 23 de outubro de 2013. Estabelece disposições e critérios para classificação, registro, comercialização e uso de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, entre outros. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 out. 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-53-2013-com-as-alteracoes-da-in-3-de-15-01-2020.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa MAPA nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece critérios e procedimentos para registro e fiscalização de fertilizantes orgânicos e organominerais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CHENG, B.; FURTADO, A.; HENRY, R. J. The coffee bean transcriptome explains the accumulation of the major bean components through ripening. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 11414, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29842-4>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CONNORTON, J. M.; BALK, J.; RODRÍGUEZ-CELMA, J. Iron homeostasis in plants: a brief overview. **Metallomics**, v. 9, n. 7, p. 813-823, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C7MT00136C>. Acesso em: 18 jan. 2026.

DEUNER, S.; ALVES, J. D.; FRIES, D. D.; ZANANDREA, I.; GOULART, P. F. P.; HENRIQUE, P. C.; LIMA, A. A.; SILVEIRA, N. M. Ácido ascórbico e peróxido de hidrogênio influenciam a atividade de enzimas do sistema antioxidante e o movimento estomático em cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5., 2007,

Águas de Lindóia. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2007. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2523>. Acesso em: 18 jan. 2026.

DEUNER, S.; ALVES, J. D.; FRIES, D. D.; ZANANDREA, I.; LIMA, A. A.; HENRIQUE, P. C.; GOULART, P. F. P. Peróxido de hidrogênio e ácido ascórbico influenciando a atividade de enzimas antioxidantes de mudas de cafeeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 55, n. 2, p. 135-140, 2008. Disponível em: <https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/3291>. Acesso em: 18 jan. 2026.

DIAS, K. G. de L.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E.; SILVEIRA, H. R. O. de; LACERDA, J. J. de J. Effect of magnesium on gas exchange and photosynthetic efficiency of coffee plants grown under different light levels. **Agriculture**, v. 7, n. 10, 85, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture7100085>. Acesso em: 18 jan. 2026.

DROUX, M. Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: a survey. **Photosynthesis Research**, v. 79, n. 3, p. 331-348, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000017196.95499.11>. Acesso em: 18 jan. 2026.

ERENOĞLU, E. B.; MORSY, M. M.; DÜNDAR, Ş. The effect of organomineral fertilizer phosphorus on the availability of phosphorus in a calcareous soil. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 21, n. 5, p. 4545-4562, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.15666/aeer/2105_45454562. Acesso em: 18 jan. 2026.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; SANTANA, M. J.; SILVA, R. O.; DIAS, M. M. Use of organic fertilization with irrigation in coffee production in Brazilian cerrado. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 5, e2578, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2578>. Acesso em: 18 jan. 2026.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; CORREA, F.; SILVA, R. O. Adubação orgânica e organomineral do cafeeiro irrigado por gotejamento. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 14, supl. 1, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.1.e8621>. Acesso em: 18 jan. 2026.

FREITAS, T.; OLIVEIRA, D. P.; DUTRA, M. P.; ZITO, P. C.; REIS, E. A. C.; FERNANDES, T. J.; NUNES, A. P. P.; GUIMARÃES, R. J.; RABÊLO, F. H. S.; GUELFI, D. Blending controlled-release and urease-inhibitor technologies as innovative solutions to reduce ammonia emissions in coffee environments. **Soil Systems**, v. 7, n. 4, 83, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040083>. Acesso em: 18 jan. 2026.

GUPTA, R.; VERMA, N.; TEWARI, R. K. Micronutrient deficiency induced oxidative stress in plants. **Plant Cell Reports**, v. 43, n. 9, 213, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6>. Acesso em: 18 jan. 2026.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 259-266, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>. Acesso em: 18 jan. 2026.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, v. 237, p. 173-195, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>. Acesso em: 18 jan. 2026.

KHAN, F.; SIDDIQUE, A. B.; SHABALA, S.; ZHOU, M.; ZHAO, C. Phosphorus plays key

roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 15, 2861, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12152861>. Acesso em: 18 jan. 2026.

KOPRIVA, S.; MALAGOLI, M.; TAKAHASHI, H. Sulfur nutrition: impacts on plant development, metabolism, and stress responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 16, p. 4069-4073, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz319>. Acesso em: 18 jan. 2026.

LÓPEZ-VELÁZQUEZ, J. C.; HARO-GONZÁLEZ, J. N.; GARCÍA-MORALES, S.; ESPINOSA-ANDREWS, H.; NAVARRO-LÓPEZ, D. E.; MONTERO-CORTÉS, M. I.; QUI-ZAPATA, J. A. Evaluation of the physicochemical properties of chitosans in inducing the defense response of *Coffea arabica* against the fungus *Hemileia vastatrix*. **Polymers**, v. 13, n. 12, 1940, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13121940>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, J. C. L. Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação. In: SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P.; TOMAZ, M. A.; BORÉM, A. (ed.). **Café arábica: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. p. 64-103.

MOTA, R. P. da; FERRAZ-ALMEIDA, R.; CAMARGO, R. de; FRANCO, M. H. R.; DELVAUX, J. C.; LANA, R. M. Q. Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): fertilizer levels and application times. **Coffee Science**, v. 18, e182098, p. 1-10, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.25186/v18i.2098>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RAMALHO, J. C.; MARQUES, I.; PAIS, I. P.; ARMENGAUD, J.; GOUVEIA, D.; RODRIGUES, A. P.; DUBBERSTEIN, D.; LEITÃO, A. E.; RAKOČEVIĆ, M.; SCOTTI-CAMPOS, P.; MARTINS, S.; SEMEDO, M. C.; PARTELLI, F. L.; LIDON, F. C.; DAMATTA, F. M.; RIBEIRO-BARROS, A. I. Stress resilience in *Coffea arabica* and *Coffea canephora* under harsh drought and/or heat conditions: selected genes, proteins, and lipid integrated responses. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 1623156, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1623156>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RAWEL, H.; SAGU, S. T. The potentials of green coffee proteins as new functional food components. **Proceedings**, v. 89, n. 1, 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ICC2023-14827>. Acesso em: 18 jan. 2026.

REIS, A. R.; FAVARIN, J. L.; GRATÃO, P. L.; CAPALDI, F. R.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant metabolism in coffee (*Coffea arabica* L.) plants in response to nitrogen supply. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 3-4, p. 203-213, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40626-015-0045-3>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 658-666, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SARKIS, L. F.; DUTRA, M. P.; OLIVEIRA, D. P.; FERNANDES, T. J.; SOUZA, T. R. de; BUILES, V. R.; GUELF, D. Ammonia volatilization from conventional and stabilized

fertilizers, agronomic aspects and microbiological attributes in a Brazilian coffee crop system. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 1291662, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1291662>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SOBREIRA, F. M.; GUIMARÃES, R. J.; COLOMBO, A.; SCALCO, M. S.; CARVALHO, J. G. Nitrogen and potassium fertigation in coffee at the formation phase, with high plant density. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 9-16, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2011.v46.9305>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SOBREIRA, H. de A.; FERREIRA, M. V.; FARIA, A. M. de; ASSUNÇÃO, R. M. N. de. Commercial organomineral fertilizer produced through granulation of a blend of monoammonium phosphate and pulp and paper industry waste post-composting. **Industrial Crops and Products**, v. 222, part 3, 119816, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119816>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SOUSA, R. N. de; PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L.; ALLEONI, L. R. F. Liming and soil texture affect the miscible displacement of phosphorus from organic and mineral sources in tropical oxisols. **Science of the Total Environment**, v. 961, 178341, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178341>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SOUZA, T. L. de; OLIVEIRA, D. P. de; SANTOS, C. F.; REIS, T. H. P.; CABRAL, J. P. C.; RESENDE, É. R. da S.; FERNANDES, T. J.; SOUZA, T. R. de; BUILES, V. R.; GUELFÍ, D. Nitrogen fertilizer technologies: opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 345, 108317, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108317>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003. 352 p. ISBN 978-0-12-656446-4.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TOMAZ, M. A.; SILVA, S. R.; SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 885-892, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500013>. Acesso em: 18 jan. 2026.

UDDIN, M. K.; SAHA, B. K.; WONG, V. N. L.; PATTI, A. F. Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: a comprehensive review. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 127433, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127433>. Acesso em: 18 jan. 2026.

ZHANG, Y.; ZHOU, H.; TANG, Y.; LUO, Y.; ZHANG, Z. Hydrogen peroxide regulated salicylic acid- and jasmonic acid-dependent systemic defenses in tomato seedlings. **Food Science and Technology**, v. 42, e54920, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/fst.54920>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CAPÍTULO 2

Dinâmica e efeito residual de fertilizantes minerais e organominerais em solos do Cerrado de texturas contrastantes

RESUMO

Avaliou-se, em incubação em vasos, a evolução de atributos químicos de dois solos do Cerrado, Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, Neo, e Latossolo Vermelho Distrófico típico, Lato, após aplicação de três formulações 3-15-15, fertilizante mineral farelado, M.f, e organominerais de esterco de frango, OM.f e OM.p. O delineamento foi inteiramente casualizado fatorial 3×2 , com quatro repetições. As amostragens ocorreram na camada 0 a 0,2 m aos 15, 90 e 150 dias após aplicação dos fertilizantes (DAAF), na zona de reação do insumo. Quantificaram-se pH em CaCl_2 , P Mehlich-1, cátions trocáveis, S-SO_4^{2-} , indicadores do complexo de troca, Al^{3+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, matéria orgânica e micronutrientes. Aos 15 DAAF, o contraste textural dominou pH e bases, com valores maiores no Lato e maior Al^{3+} e saturação por alumínio no Neo; P apresentou interação, com maior teor inicial no Neo sob M.f. Aos 90 DAAF, manteve-se a diferença entre solos para pH e bases e surgiram interações para P, K^+ e S-SO_4^{2-} ; no Neo, OM.f elevou P e K^+ , enquanto no Lato M.f manteve P mais alto. Aos 150 DAAF, ampliaram-se interações para pH, P, K^+ , S-SO_4^{2-} e capacidade de troca; no Neo, organominerais sustentaram P e K^+ superiores ao mineral, e no Lato OM.f elevou pH e reduziu $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e saturação por alumínio. Observou-se aumento de Ca^{2+} , soma de bases e saturação por bases sob OM.f. Conclui-se que textura e forma física do insumo condicionam persistência e efeito residual no solo.

Palavras-chave: Incubação em vasos. Capacidade tampão. Interação fertilizante $\times$ solo. Alumínio trocável. Persistência de nutrientes.

ABSTRACT

A pot incubation study evaluated temporal changes in soil chemical attributes of two Cerrado

soils, a Quartzipsamment, Neo, and a dystrophic Red Oxisol, Lato, after applying three 3–15–15 formulations: a mineral fertilizer in powdered form, M.f, and poultry-litter organomineral fertilizers in powdered and pelletized forms, OM.f and OM.p. The experiment followed a completely randomized 3×2 factorial design with four replicates. Soil was sampled from the 0–20 cm layer at 15, 90, and 150 days after fertilizer application, DAAF, within the fertilizer reaction zone. The following attributes were determined: pH in CaCl_2 , Mehlich-1 P, exchangeable cations, sulfate-S, exchange-complex indicators, exchangeable Al^{3+} , potential acidity, soil organic matter, and micronutrients. At 15 DAAF, soil texture contrast dominated pH and base status, with higher pH and bases in Lato and higher Al^{3+} and Al saturation in Neo; P showed fertilizer $\times$ soil interaction, with higher initial P in Neo under M.f. At 90 DAAF, soil-type differences in pH and bases persisted and interactions emerged for P, K^+ and sulfate-S; in Neo, OM.f increased P and K^+ , whereas in Lato M.f maintained higher P. At 150 DAAF, interactions became more frequent for pH, P, K^+ , sulfate-S and cation exchange capacity; in Neo, organominerals sustained higher P and K^+ than the mineral source, and in Lato OM.f increased pH while lowering potential acidity and Al saturation. OM.f also increased Ca^{2+} , sum of bases and base saturation. Overall, soil texture and fertilizer physical form governed nutrient persistence and residual behavior.

Keywords: Pot incubation. Buffering capacity. Fertilizer $\times$ soil interaction. Exchangeable aluminum. Nutrient persistence.

1 INTRODUÇÃO

Em solos tropicais sob uso agrícola, a eficiência da adubação é determinada pela textura, pela mineralogia e pela acidez do solo. Em solos arenosos, a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e a maior percolação aumentam as perdas de potássio (K) e de enxofre na forma sulfato (SO_4^{2-}). Em solos argilosos e intensamente intemperizados, a principal limitação é a retenção de fósforo por óxidos de ferro e alumínio, o que reduz sua permanência na solução do solo após a aplicação (Schaefer *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2011; Rosolem; Steiner, 2017).

Esse contraste limita recomendações baseadas apenas na composição química do fertilizante. Na cafeicultura, fertilizantes organominerais formulados com resíduos orgânicos, como a cama de frango, associam fornecimento mineral inicial e liberação distribuída ao longo do tempo. Essa combinação amplia a permanência de nutrientes na zona radicular e altera a dinâmica do fósforo em solos tropicais, com resposta definida pela dose, pela formulação e pela textura do solo (Sá *et al.*, 2017; Benites *et al.*, 2022).

A forma física do fertilizante também interfere na trajetória de liberação e no alcance das reações na zona de aplicação. Produtos farelados, por maior área de contato, intensificam a dissolução inicial e elevam a concentração de nutrientes na solução em curto prazo. *Pellets* e grânulos, por maior compactação, reduzem a velocidade de dissolução, distribuem o suprimento no tempo e diminuem o risco de deslocamento em solos leves, além de limitar picos que aceleram a imobilização do fósforo em solos com alta reatividade mineral (Rodrigues *et al.*, 2021; Erenoğlu *et al.*, 2023; Netto-Ferreira *et al.*, 2024).

Com base nesses fundamentos, este capítulo avaliou o comportamento temporal de atributos químicos do solo após a aplicação de fertilizante mineral e de fertilizantes organominerais nas formas farelada e peletizada em dois solos tropicais de textura contrastante. Foram acompanhados indicadores do equilíbrio ácido-base, da toxicidade por alumínio, da disponibilidade de macronutrientes e micronutrientes e dos componentes do complexo de troca, em três momentos de avaliação, que permitiram distinguir resposta inicial, estabilização do sistema e efeito residual. O foco foi na permanência de nutrientes no perfil superficial, no risco de perdas e na qualidade química do ambiente radicular.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O ensaio foi conduzido entre junho e novembro de 2023, em casa de vegetação do *Campus* Umuarama da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em Uberlândia, Minas Gerais, nas coordenadas 18°91'86" S e 48°27'72" O, a 800 m de altitude. O clima regional é Aw, segundo a classificação de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 3×2 . O fator fertilizante foi composto por um fertilizante mineral farelado e por dois fertilizantes organominerais à base de esterco de frango, nas formas farelada e peletizada. As três fontes apresentaram 3% de nitrogênio (N), 15% de pentóxido de fósforo (P_2O_5) e 15% de óxido de potássio (K_2O). O fator solo foi composto por Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico (Neo) e Latossolo Vermelho Distrófico típico (Lato), conforme EMBRAPA (2018).

As garantias químicas dos fertilizantes utilizados no experimento são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos fertilizantes organominerais à base de esterco de frango (OMef) e fertilizante mineral.

Fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg %	S	B	Zn
OMef peletizado	3,00	15,00	15,00	3,90	0,70	1,10	0,02	0,04
OMef farelado	3,00	15,00	15,00	3,80	0,80	1,20	0,02	0,04
Mineral farelado	3,00	15,00	15,00	0,60	0,30	1,50	0,03	0,08

Legenda: Teores expressos em %, conforme formulação comercial declarada.

Fonte: Fabricantes.

A Tabela 2 mostra equivalência nos teores de N, P_2O_5 e K_2O entre as três fontes. Assim, as diferenças observadas ao longo do tempo decorrem da matriz orgânica e da forma física dos fertilizantes. Os organominerais também apresentaram maiores teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), o que é relevante para a interpretação de soma de bases, saturação por bases e dinâmica de cargas no solo.

2.3 Matriz orgânica utilizada na formulação organomineral

A caracterização química da matriz orgânica animal usada nos organominerais é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição da matriz de esterco de frango.

pH	Umidade %	Relação C/N	COT	N Total	P ₂ O ₅ Total g kg ⁻¹	K ₂ O Solúvel
5,8	10,0	3,2:1	187,0	58,0	210,0	16,0

Legenda: Valores referentes ao fertilizante *in natura*. pH em suspensão aquosa 1:2,5 (v/v). Umidade por método gravimétrico; secagem em estufa a 65 °C até massa constante. COT (carbono orgânico total) por combustão seca. N-total por digestão sulfúrica. P₂O₅-total por digestão nitroperclórica e leitura por espectrofotometria UV-Vis. K₂O solúvel em água por extração aquosa e leitura por espectrofotometria de emissão de chama. Metodologias conforme MAPA (2017) e AOAC (2007).

A Tabela 3 indica pH 5,8, relação C/N de 3,2:1 e altos teores de N total e P₂O₅ total, evidenciando alta labilidade e rápida mineralização, com potencial de afetar a liberação e a retenção de nutrientes no solo.

2.4 Solos estudados, preparo das unidades experimentais e instalação

A caracterização inicial dos solos (física e química) está na Tabela 4. As amostras (0–0,2 m) foram secas ao ar e peneiradas (5 mm), conforme EMBRAPA (1997).

Tabela 4 - Propriedades dos solos estudados (Neo e Lato).

(a) Atributos químicos

Solo	pH CaCl ₂	P _{Mehlich-1}	K ⁺ mg dm ⁻³	S-SO ₄ ²⁻ mg dm ⁻³	K ⁺ cmol _c .dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c .dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c .dm ⁻³	Al ³⁺ cmol _c .dm ⁻³	H ⁺ +Al ³⁺ cmol _c .dm ⁻³
Neo	5,3	15,90	30,00	4,70	0,08	0,91	0,31	0,14	3,75
Lato	5,6	7,90	37,00	10,80	0,09	1,14	0,38	0,00	2,86

(b) Matéria orgânica, complexos de troca e micronutrientes

Solo	MO dag.kg ⁻¹	SB cmol _c .dm ⁻³	t cmol _c .dm ⁻³	T cmol _c .dm ⁻³	V %	m %	B mg.dm ⁻³	Cu mg.dm ⁻³	Fe mg.dm ⁻³	Mn mg.dm ⁻³	Zn mg.dm ⁻³
Neo	1,30	1,30	1,44	5,05	26,00	10,00	0,34	2,69	3,00	1,47	1,78
Lato	1,60	1,61	1,61	4,47	36,00	0	0,16	2,68	4,00	1,51	0,11

(c) Granulometria

Solo	Areia g Kg ⁻¹	Silte g Kg ⁻¹	Argila g Kg ⁻¹
Neo	690	70	240
Lato	490	120	390

Legenda: Neo = Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico; Lato = Latossolo Vermelho Distrófico típico. pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); S-SO₄²⁻ (fosfato monobásico de cálcio); Ca, Mg, Al (KCl 1 mol L⁻¹); H⁺+Al (SMP pH 7,5); MO (colorimetria). SB, t, T, V e m conforme indicado. B (BaCl₂·2H₂O a quente); Cu, Fe, Mn (DTPA+TEA+CaCl₂, pH 7,3). Textura: pipeta (agitação lenta).

A Tabela 4 mostra contraste textural entre os solos, com maior teor de areia no Neo e maior teor de argila no Lato. Também registra diferenças em fósforo disponível, alumínio trocável e saturação por bases, variáveis que estruturam a interpretação temporal da disponibilidade e da permanência de nutrientes após a aplicação dos fertilizantes.

As etapas de instalação do experimento e a aplicação localizada dos fertilizantes são apresentadas na Figura 1.



Figura 1 - Instalação do experimento e aplicação localizada dos fertilizantes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 1 mostra a disposição dos vasos e a padronização do ponto de aplicação do fertilizante. Esse procedimento reduz a variação espacial do contato entre solo e insumo e permite interpretar com maior precisão o gradiente de liberação de nutrientes no entorno do compartimento.

O procedimento de controle hídrico e a redução de perdas por evaporação são apresentados na Figura 2.



Figura 2 - Cobertura dos vasos para controle hídrico e redução da evaporação.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 2 mostra o sistema de cobertura adotado para manter a umidade do solo a 80% da capacidade de campo e reduzir perdas por evaporação ao longo do ensaio. As perfurações asseguraram aeração e impediram saturação excessiva, preservando a uniformidade das condições hídricas entre as unidades experimentais.

2.5 Aplicação dos fertilizantes e manejo hídrico

A aplicação foi realizada em compartimentos confeccionados com malha de nylon permeável, posicionados a 1 cm de profundidade no centro de cada vaso. Os vasos plásticos tinham capacidade de 20 L e receberam 18 kg de solo seco ao ar e peneirado. Após a instalação dos tratamentos, o solo foi umedecido a 80% da capacidade de campo. Esse teor de

água foi mantido durante todo o período experimental por reposições hídricas controladas a partir da variação da massa dos vasos.

Os fertilizantes organominerais foram produzidos com as mesmas matérias primas do fertilizante mineral, com ureia como fonte de N, fosfato monoamônico como fonte de P e N e cloreto de potássio como fonte de K. A dose de referência foi definida com base em P_2O_5 , equivalente a 250 kg ha^{-1} , alinhada às recomendações para implantação do cafeeiro em solos com baixos teores de fósforo, conforme Ribeiro *et al.* (1999).

2.6 Análise de solo

A dinâmica dos atributos químicos do solo foi avaliada na camada de 0,0 a 0,2 m, aos 15, 90 e 150 dias após a aplicação dos fertilizantes (DAAF), conforme Afrizal *et al.* (2023). Esses três tempos permitiram registrar a resposta inicial, a fase intermediária e o efeito residual dos fertilizantes no solo.

As amostras foram coletadas no entorno da zona de inserção do compartimento com fertilizante, a fim de representar a região de maior interação entre solo e insumo. As subamostras foram homogeneizadas para compor uma amostra por unidade experimental, identificadas e encaminhadas ao Laboratório Safrar Análises Agrícolas. As determinações químicas seguiram o protocolo descrito por Bataglia *et al.* (1983).

2.7 Análise estatística

A identificação de valores extremos foi realizada por inspeção de boxplots dos resíduos no software SPSS Statistics®, conforme Chambers *et al.* (1983). Valores atípicos foram tratados como perdas de parcela e substituídos por estimativas obtidas pelo método da soma mínima dos quadrados dos resíduos. Para cada substituição foi retirado um grau de liberdade do erro experimental (Gomes; Garcia, 2002).

A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se $p > 0,01$. Após o atendimento das pressuposições, a análise de variância foi realizada no software SISVAR®, em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3×2 . Quando houve efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS

3.1 ANAVA e teste de médias

Os resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 5, e as médias comparadas pelo teste de Tukey estão apresentadas na Tabela 6.

Para facilitar a leitura, o Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico será referido como Neo; o Latossolo Vermelho Distrófico típico, como Lato; o fertilizante mineral farelado, como M.f.; o fertilizante organomineral farelado, como OM.f.; e o fertilizante organomineral peletizado, como OM.p.

Tabela 5 - ANAVA (teste F) de atributos químicos do solo (15, 90 e 150 DAAF).

<i>FV - 15 DAAF</i>	g.l.	pH CaCl ₂	P _{Meh.1}	K	Ca	Mg	S
Fertilizante (F)	2	0,568 ^{ns}	2,532 ^{ns}	3,563 *	2,049 ^{ns}	0,906 ^{ns}	2,158 ^{ns}
Solo (S)	1	808,892**	112,507**	0,038 ^{ns}	768,355 **	950,977 **	5,318 *
F*S	2	1,000 ^{ns}	8,450**	1,184 ^{ns}	0,682 ^{ns}	3,225 ^{ns}	0,830 ^{ns}
erro	18						
CV (%)		2,33	12,51	31,42	7,75	7,06	28,30
		SB	V	T	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	m
Fertilizante (F)	2	4,712 *	0,571 ^{ns}	0,604 ^{ns}	0,775 ^{ns}	0,549 ^{ns}	1,581 ^{ns}
Solo (S)	1	1171,916 **	1128,940**	73,897 **	143,145 **	236,326 **	282,963 **
F*S	2	3,000 ^{ns}	2,928 ^{ns}	1,117 ^{ns}	0,775 ^{ns}	0,768 ^{ns}	1,581 ^{ns}
erro	18						
CV (%)		5,78	7,57	9,22	40,95	15,69	29,12
		MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Fertilizante (F)	2	1,082 ^{ns}	1,832 ^{ns}	0,226 ^{ns}	22,580 **	4,261 *	4,015 *
Solo (S)	1	404,734 **	0,814 ^{ns}	8,521 **	2107,678 **	22,028 **	22,234 **
F*S	2	0,816 ^{ns}	1,136 ^{ns}	0,088 ^{ns}	3,678 *	3,945 *	0,706 ^{ns}
erro	18						
CV (%)		8,23	67,53	13,96	6,57	11,70	23,69
<i>FV - 90 DAAF</i>	g.l.	pH CaCl ₂	P _{Meh.1}	K	Ca	Mg	S
Fertilizante (F)	2	0,139 ^{ns}	4,008 *	14,102 **	1,697 ^{ns}	1,095 ^{ns}	5,908 *
Solo (S)	1	37,932 **	0,242 ^{ns}	1,256 ^{ns}	58,625 **	42,166 **	4,428 *
F*S	2	0,154 ^{ns}	28,534 **	37,613 **	1,072 ^{ns}	0,642 ^{ns}	25,566 **
erro	18						
CV (%)		4,78	30,82	24,53	22,18	25,70	24,14
		SB	V	T	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	m
Fertilizante (F)	2	1,987 ^{ns}	0,405 ^{ns}	0,700 ^{ns}	0,233 ^{ns}	0,536 ^{ns}	1,075 ^{ns}
Solo (S)	1	54,487 **	97,596 **	4,843 **	546,076 **	40,182 **	390,732 **
F*S	2	0,781 ^{ns}	0,220 ^{ns}	0,586 ^{ns}	0,234 ^{ns}	0,279 ^{ns}	0,973 ^{ns}
erro	18						
CV (%)		20,94	18,30	9,08	20,14	16,07	23,73
		MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Fertilizante (F)	2	0,396 ^{ns}	7,475 **	2,699 ^{ns}	3,000 ^{ns}	6,556 **	6,142 **
Solo (S)	1	40,661 **	5,987 *	1,598 ^{ns}	0,158 ^{ns}	58,153 **	95,650 **
F*S	2	0,092 ^{ns}	77,643 **	0,400 ^{ns}	2,053 ^{ns}	21,520 **	0,453 ^{ns}
erro	18						
CV (%)		12,32	21,63	9,13	6,26	7,42	21,88

Tabela 5 - Continuação

<i>FV - 150 DAAF</i>	g.l.	pH CaCl ₂	P _{Meh.1}	K	Ca	Mg	S
Fertilizante (F)	2	2,335 ^{ns}	23,238 **	13,026 *	3,715 *	2,713 ^{ns}	5,398 *

Solo (S)	1	1,306 ^{ns}	120,556 ^{**}	0,650 ^{ns}	0,115 ^{ns}	0,005 ^{ns}	17,099 ^{**}
F*S	2	7,846 [*]	23,494 ^{**}	5,032 ^{**}	0,960 ^{ns}	0,978 ^{ns}	7,145 ^{**}
erro	18						
CV (%)		5,22	22,71	28,29	51,79	54,04	24,82
		SB	V	T	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	m
Fertilizante (F)	2	4,526 [*]	3,656 [*]	1,312 ^{ns}	3,368 ^{ns}	6,428 ^{**}	7,066 ^{**}
Solo (S)	1	0,150 ^{ns}	1,007 ^{ns}	2,127 ^{ns}	14,205 ^{**}	9,234 ^{**}	8,801 ^{**}
F*S	2	0,888 ^{ns}	3,089 ^{ns}	4,382 [*]	7,171 ^{**}	8,887 ^{**}	4,085 [*]
erro	18						
CV (%)		46,32	44,27	13,42	49,01	18,21	60,76
		MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Fertilizante (F)	2	1,291 ^{ns}	25,892 ^{**}	0,224 ^{ns}	11,380 ^{**}	0,764 ^{ns}	1,428 ^{ns}
Solo (S)	1	204,126 ^{**}	32,992 ^{**}	11,270 ^{**}	1330,565 ^{**}	29,921 ^{**}	65,299 ^{**}
F*S	2	0,417 ^{ns}	21,216 ^{**}	1,637 ^{ns}	13,728 ^{**}	0,078 ^{ns}	0,708 ^{ns}
erro	18						
CV (%)		11,38	18,14	8,34	9,17	15,81	8,06

Legenda: Solos: Neo: Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico; Lato: Latossolo Vermelho Distrófico típico. Fertilizantes: M.f: mineral farelado; OM.f: organomineral (esterco de frango) farelado; OM.p: organomineral (esterco de frango) peletizado. Estatística: FV: fonte de variação; gl: graus de liberdade; ns: não significativo; *: $p \leq 0,05$; **: $p \leq 0,01$. Variáveis: pH: CaCl_2 0,01 mol L⁻¹; PMeh.1: Mehlich-1; SB: soma de bases; V: saturação por bases; T: CTC a pH 7,0; H⁺+Al: acidez potencial; m: saturação por Al; MO: matéria orgânica. DAAF: dias após aplicação dos fertilizantes.

A Tabela 5 mostra predominância do fator solo aos 15 e 90 DAAF, sobretudo para variáveis ligadas ao complexo de troca e à acidez. Aos 150 DAAF, a interação fertilizante $\times$ solo tornou-se mais frequente, especialmente para pH, P Mehlich-1, K, S, T, Al³⁺, H⁺+Al³⁺ e m.

A Tabela 6 apresenta as médias e a comparação pelo teste de Tukey das variáveis químicas do solo aos 15, 90 e 150 DAAF.

[illegible]

Tabela 6 - Continuação

	15 DAAF				90 DAFF				150 DAAF			
V %	Neo	19,33 b	Neo	22,08 b	M.f		24,63 b					
					OM.f		46,00 a					
	Lato	61,08 a	Lato	47,92 a	OM.p		36,88 ab					
T cmol _c dm ⁻³	Neo	5,17 a	Neo	5,16 a	Neo	M.f 3,86 b OM.f 5,13 a OM.p 4,58 ab	M.f Neo 3,86 a Lato 4,29 a Neo 5,13 a					
	Lato	3,73 b	Lato	4,73 b	Lato	M.f 4,29 a	OM.f Lato 3,85 b					
						OM.f 3,85 a	OM.p Neo 4,58 a					
						OM.p 4,39 a	Lato 4,39 a					
	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Neo	0,55 b	Neo	0,58 a	Neo	M.f 0,23 a OM.f 0,21 a OM.p 0,09 b	M.f Neo 0,23 b Lato 0,12 a Neo 0,21 a				
		Lato	0,00 a	Lato	0,01 b	Lato	M.f 0,12 a	OM.f Lato 0,00 b				
OM.f 0,00 b							OM.p Neo 0,09					
OM.p 0,12 a							Lato 0,12					
H ⁺ +Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³		Neo	4,19 a	Neo	4,01 a	Neo	M.f 3,43 a OM.f 3,46 a OM.p 2,80 a	M.f Neo 3,43 a Lato 3,40 a Neo 3,46 a				
		Lato	1,43 b	Lato	2,56 b	Lato	M.f 3,40 a	OM.f Lato 1,52 b				
	OM.f 1,52 b						OM.p Neo 2,80 a					
	OM.p 2,80 a						Lato 2,80 a					
	m %	Neo	34,42 a	Neo	38,44 a	Neo	M.f 25,67 a OM.f 13,75 ab OM.p 6,75 b	M.f Neo 25,67 a Lato 11,58 b Neo 13,75 a				
		Lato	0,00 b	Lato	0,83 b	Lato	M.f 11,58 a	OM.f Lato 0,00 b				
OM.f 0,00 b							OM.p Neo 6,75 a					
OM.p 9,75 a							Lato 9,75 a					
B mg dm ⁻³		0,315	Neo	M.f 0,63 a OM.f 0,32 b OM.p 0,18 b	M.f Neo 0,63 a Lato 0,18 b Neo 0,32 a	Neo	M.f 0,18 b OM.f 0,38 a OM.p 0,28 ab	M.f Neo 0,18 b Lato 0,30 a Neo 0,38 a				
			Lato	M.f 0,18 c	Lato 0,36 a	Lato	M.f 0,30 b	OM.f Lato 0,34 a				
	OM.f 0,36 b			OM.p Neo 0,18 b	Lato	OM.f 0,34 b	OM.p Neo 0,28 b					

Tabela 6. Continuação																				
	15 DAAF						90 DAAF						150 DAAF							
Cu mg dm ⁻³	Neo		0,40 b						0,69				Neo		0,69 b					
	Lato		0,47 a										Lato		0,77 a					
Fe mg dm ⁻³	Neo	M.f	22,75 a	M.f	Neo	22,75 a	16,42						Neo	M.f	19,25 b	M.f	Neo	19,25 a		
		OM.f	19,67 b		Lato	6,00 b								OM.f	Lato		4,25 b			
		OM.p	19,00 b		Neo	19,67 a								OM.p	Neo		24,00 a			
	Lato	M.f	6,00 a	Lato	3,75 b	OM.f							Lato	3,75 b	Lato	M.f	4,25 a	OM.p	Lato	3,75 b
		OM.f	3,75 b	Neo	19,00 a								OM.f	Neo		19,00 a				
		OM.p	5,00 ab	Lato	5,00 b								OM.p	Lato		3,75 b				
Mn mg dm ⁻³	Neo	M.f	2,44 a	M.f	Neo	2,44 a	Neo						Neo	M.f	1,62 b	M.f	Neo	1,62 a		
		OM.f	1,83 b		Lato	2,53 a								OM.f	Lato		1,31 b			
		OM.p	1,76 b		Neo	1,83 a								OM.p	Neo		1,86 a			
	Lato	M.f	2,53 a	Lato	2,44 b	OM.f							Lato	1,17 b	Lato	M.f	1,31 a	OM.f	Lato	1,17 b
		OM.f	2,44 a	Neo	1,76 a								OM.f	Neo		1,33 a				
		OM.p	2,58 a	Lato	2,58 b								OM.p	Lato		1,33 a				
Zn mg dm ⁻³	Neo	0,74 a	M.f	0,71 a	Neo	0,73 a	M.f	0,45 b	Neo	0,94 a										
			OM.f	0,57 ab			OM.f	0,62 a												
	Lato	0,46 b	OM.p	0,52 b	Lato	0,28 b	OM.p	0,45 a	Lato	0,72 b										
MO dag kg ⁻¹	Neo	2,41 a		Neo	2,24 a		Neo	2,43 a												
	Lato	1,19 b		Lato	1,62 b		Lato	1,22 b												

Legenda: Médias dos atributos químicos do solo aos 15, 90 e 150 DAAF (dias após aplicação dos fertilizantes) em Neo (Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico) e Lato (Latossolo Vermelho Distrófico típico), sob M.f (mineral farelado), OM.f (organomineral de esterco de frango farelado) e OM.p (organomineral de esterco de frango peletizado). Variáveis/unidades: pH (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹); P (Mehlich-1, mg dm⁻³); K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, t, T (cmolc dm⁻³); S-SO₄²⁻ (mg dm⁻³); V, m (%); B, Cu, Fe, Mn, Zn (mg dm⁻³); MO (dag kg⁻¹). ANAVA fatorial 3×2, DIC, 4 repetições, por tempo. Letras iguais: Tukey ($p \leq 0,05$) no mesmo tempo e critério do bloco. Com interação fertilizante×solo, compara-se dentro do solo; sem interação, médias dos fatores principais.

A Tabela 6 organiza as médias por tempo e por critério de comparação. O conjunto permite identificar diferenças entre Neo e Lato quando o efeito solo foi predominante e, quando houve interação, diferenças entre M.f., OM.f. e OM.p. dentro de cada solo.

3.1.1 Potencial hidrogeniônico em solução de cloreto de cálcio - pH CaCl_2

O pH em CaCl_2 diferiu entre os solos aos 15 e 90 dias após a aplicação dos fertilizantes. Na primeira avaliação, o Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico (Neo) apresentou pH 4,62, enquanto o Latossolo Vermelho Distrófico típico (Lato) registrou 6,06. Aos 90 dias, o contraste permaneceu, com 4,69 no Neo e 6,29 no Lato.

Na avaliação final, aos 150 dias, a resposta passou a depender da combinação entre solo e fertilizante. No Neo, o pH variou de 4,70 a 4,95: 4,95 com o fertilizante mineral farelado (M.f.), 4,70 com o organomineral farelado (OM.f.) e 4,85 com o organomineral peletizado (OM.p.). No Lato, a fonte mineral e o peletizado mantiveram o mesmo valor, 4,73, ao passo que o organomineral farelado elevou o pH para 5,40.

3.1.2 Fósforo extraível por Mehlich-1 - P Mehlich-1

Os teores de fósforo, expressos em mg dm^{-3} , apresentaram interação entre fertilizante e solo nas três datas de avaliação.

Aos 15 dias, o Neo mostrou 12,50 com M.f., 8,80 com OM.f. e 10,00 com OM.p. No Lato, os resultados foram mais baixos: 4,00, 4,97 e 5,85, nessa ordem.

Aos 90 dias, o comportamento mudou. No Neossolo, o menor teor ocorreu com o fertilizante mineral 4,53, enquanto o organomineral farelado atingiu 11,45 e o peletizado, 9,25. No Latossolo, a maior concentração apareceu com M.f., 16,71, seguida por 5,70 com OM.f. e 6,35 com OM.p.

Aos 150 dias, o contraste se acentuou no Neo. O fósforo ficou em 4,65 com a fonte mineral, subiu para 21,80 com o organomineral farelado e atingiu 17,63 com o peletizado. No Lato, os valores foram 6,68, 5,85 e 4,43.

3.1.3 Potássio disponível - K^+

Os teores estão expressos em cmolc dm^{-3} . Aos 15 dias, a análise de variância indicou efeito de fertilizante, embora o teste de médias não tenha separado os tratamentos. Ainda

assim, os valores observados foram 0,146 com M.f., 0,101 com OM.f. e 0,153 com OM.p. Esse padrão sugere variação inicial entre fontes, mas com amplitude insuficiente para gerar diferença estatística nas comparações múltiplas.

Aos 90 dias, a resposta passou a depender do solo. No Neo, o maior teor de K ocorreu com o organomineral farelado, 0,24, enquanto a fonte mineral e o peletizado apresentaram 0,05. No Lato, os valores foram próximos entre si: 0,13 com M.f. e 0,16 com as duas formulações organominerais. Isso indica que a dinâmica do K foi condicionada pela matriz do solo, com maior contraste de fontes no Neo e maior estabilidade no Lato.

Aos 150 dias, o Neossolo apresentou 0,17 com a fonte mineral, 0,21 com OM.f. e 0,19 com OM.p. No Latossolo, os resultados ficaram em 0,13, 0,16 e 0,19.

3.1.4 Cálcio e magnésio trocáveis - Ca^{2+} , Mg^{2+}

Os teores estão em cmolc dm^{-3} . Aos 15 e 90 DAAF, Ca e Mg responderam ao fator solo, indicando diferenças consistentes entre Neo e Lato nessas avaliações; aos 150 DAAF, apenas Ca apresentou resposta ao fertilizante.

Para Ca, no Neo os valores foram 0,64 (15 DAAF) e 0,73 (90 DAAF), enquanto no Lato foram superiores, 1,63 e 1,51, respectivamente. Aos 150 DAAF, Ca variou entre fontes, com 0,64 para M.f., 1,37 para OM.f. e 1,16 para OM.p., evidenciando maior manutenção/elevação de Ca com as formulações organominerais.

Para Mg, os teores permaneceram maiores no Lato (0,55 e 0,49) do que no Neossolo (0,21 e 0,24) aos 15 e 90 DAAF, e aos 150 DAAF a média geral foi 0,33.

3.1.5 Enxofre disponível na forma sulfato - S SO_4^{2-}

Os teores estão expressos em mg dm^{-3} . Aos 15 DAAF, houve efeito de solo, com 12,61 no Neo e 16,48 no Lato. Aos 90 e 150 DAAF, a resposta passou a depender da interação solo $\times$ fertilizante, indicando que o comportamento do S- SO_4^{2-} variou conforme a combinação entre tipo de solo e fonte aplicada.

Aos 90 DAAF, no Neo os teores foram 31,32 (M.f.), 23,63 (OM.f.) e 11,30 (OM.p.), enquanto no Lato foram 12,20, 37,45 e 31,93, respectivamente.

Aos 150 DAAF, no Neo os valores foram 15,65 (M.f.), 24,38 (OM.f.) e 29,45 (OM.p.), e no Lato 32,73, 47,35 e 26,23, mantendo o padrão de resposta dependente do solo e do fertilizante.

3.1.6 Soma de bases e saturação por bases - SB e V

Soma de bases é apresentada em cmolc dm^{-3} e saturação por bases em porcentagem. Aos 15 e 90 DAAF, houve predominância do efeito solo. Aos 150 DAAF, soma de bases e saturação por bases apresentaram efeito de fertilizante.

Para a soma de bases, aos 15 DAAF, o valor foi 0,98 no Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, Neo, e 2,31 no Latossolo Vermelho Distrófico típico, Lato. No mesmo tempo, as médias por fertilizante foram 1,72 com fertilizante mineral farelado, M.f, 1,58 com organomineral farelado, OM.f, e 1,63 com organomineral peletizado, OM.p. Aos 90 DAAF, a soma de bases foi 1,13 no Neo e 2,17 no Lato. Aos 150 DAAF, a soma de bases foi 0,95 com M.f, 2,00 com OM.f e 1,69 com OM.p.

Para V, o Neossolo registrou 19,33 e 22,08; o Latossolo, 61,08 e 47,92. Aos 150 dias, os valores foram 24,63 com a M.f, 46,00 com o OM.f e 36,88 com o peletizado.

3.1.7 Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 - T

Os valores estão em cmolc dm^{-3} . Aos 15 e 90 DAAF, houve efeito de solo; aos 150, interação.

O Neo apresentou 5,17 e 5,16 aos 15 e 90 dias, enquanto o Lato registrou 4,29 e 3,73.

Na última avaliação, no Neossolo, os valores foram 3,86 com M.f., 5,13 com OM.f. e 4,58 com OM.p. No Latossolo, 4,29, 3,85 e 4,39.

3.1.8 Alumínio trocável, acidez potencial e saturação por alumínio - Al^{3+} , $\text{H}^{+}+\text{Al}^{3+}$ e m

Al^{3+} e $\text{H}^{+}+\text{Al}^{3+}$ estão em cmolc dm^{-3} ; m, em %. Aos 15 e 90 DAAF, predominou o efeito do solo. Aos 150 dias, a resposta passou a depender da combinação entre solo e fertilizante.

Para alumínio trocável, Al^{3+} , aos 15 DAAF, o valor foi 0,55 no Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, Neo, e 0,12 no Latossolo Vermelho Distrófico típico, Lato. Aos 90 DAAF, o valor foi 0,58 no Neo e 0,01 no Lato. Aos 150 DAAF, no Neo, o alumínio foi 0,23 com fertilizante mineral farelado, M.f, 0,21 com organomineral farelado, OM.f, e 0,09 com organomineral peletizado, OM.p. No Lato, o alumínio foi 0,12 com M.f, 0,00 com OM.f e 0,12 com OM.p.

Para $H^+ + Al^{3+}$, o Neossolo registrou 4,19 e 4,01; o Latossolo, 3,40 e 2,56. Aos 150 dias, no Neo, os valores foram 3,43, 3,46 e 2,80; no Lato, 3,40, 1,52 e 2,80.

Para m, os valores no Neo foram 34,42 e 38,44 aos 15 e 90 DAAF; no Lato, 11,58 e 0,83. Aos 150 dias, no Neossolo, ficaram em 25,67 com M.f., 13,75 com OM.f. e 6,75 com OM.p. No Latossolo, em 11,58, 0,00 e 9,75.

3.1.9 Matéria orgânica do solo - MO

Os teores estão em $dag\ kg^{-1}$ e responderam ao solo em todos os tempos. No Neo, a matéria orgânica foi 2,41, 2,24 e 2,43 aos 15, 90 e 150 DAAF. No Lato, os valores foram 1,19, 1,62 e 1,22.

3.1.10 Micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco - B, Cu, Fe, Mn e Zn

Os teores estão em $mg\ dm^{-3}$ e variaram conforme o elemento e o tempo.

Para o boro, aos 15 DAAF, o valor médio apresentado foi 0,315. Aos 90 DAAF, no Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, Neo, foi 0,18 com fertilizante mineral farelado, 0,38 com organomineral farelado, OM.f. e 0,28 com, OM.p. No Latossolo Vermelho Distrófico típico, Lato, foi 0,30 com M.f, 0,34 com OM.f e 0,66 com OM.p.

Para Cu, os valores foram 0,40 no Neo e 0,47 no Lato aos 15 dias. Aos 90, a média foi 0,69. Aos 150, ficaram em 0,69 no Neossolo e 0,77 no Latossolo.

Para Fe, aos 15 dias, no Neo, os valores foram 22,75 com a fonte mineral, M.f., 19,67 com o organomineral farelado, OM.f. e 19,00 com o OM.p; no Lato, 6,00, 3,75 e 5,00. Aos 90 DAAF, a média foi 16,42. Aos 150 dias, no Neossolo, os teores foram 19,25, 24,00 e 19,00; no Latossolo, 4,25, 3,75 e 3,75.

Para Mn, aos 15 dias, o Neo apresentou 2,44, 1,83 e 1,76; o Lato, 2,53, 2,44 e 1,31. Aos 90 dias, no Neossolo, 1,62, 1,86 e 1,33; no Latossolo, 1,31, 1,17 e 2,58, para M.f., OM.f. e OM.p. Aos 150 dias, os valores foram 2,42 no Neo e 1,70 no Lato.

Para Zn, aos 15 DAAF, o Neossolo registrou 0,74 e o Latossolo, 0,46. Nesse mesmo tempo, as médias por fertilizante foram 0,71 com M.f., 0,57 com OM.f. e 0,52 com OM.p. Aos 90 dias, os valores foram 0,73 no Neo e 0,28 no Lato. Aos 150, 0,94 no Neossolo e 0,72 no Latossolo.

4 DISCUSSÃO

Os resultados definem três fases da dinâmica química do solo após a aplicação dos fertilizantes: resposta inicial, fase de ajuste do sistema e efeito residual. Aos 15 DAAF, o solo controlou pH, Ca, Mg e os indicadores de acidez. No Neo, a menor capacidade de troca catiônica e o menor poder tampão ampliaram a oscilação da fase trocável. No Lato, o maior teor de argila e de óxidos sustentou quadro químico mais estável (Rosolem; Steiner, 2017; Sparks, 2019).

Esse contraste ajuda a explicar o comportamento das fontes. O fertilizante mineral elevou a concentração de N, P e K logo após a aplicação. Nos organominerais, a matriz orgânica e a forma física reduziram o pico de solubilização e distribuíram o fornecimento no tempo. Por isso, a vantagem dessas fontes não apareceu de forma uniforme na primeira leitura, mas ganhou expressão nas avaliações seguintes (Sá *et al.*, 2017; Benites *et al.*, 2022).

Aos 90 DAAF, instalou-se uma fase de ajuste entre dissolução da fonte, retenção do solo e redistribuição dos íons. No Lato, os óxidos de Fe e Al elevaram a retenção de P e encurtaram a permanência da fração extraível. No Neo, a menor fixação preservou parte maior do nutriente na camada amostrada. Esse quadro favoreceu OM.f. e OM.p., com destaque para OM.f. no Neossolo (Sá *et al.*, 2017; Benites *et al.*, 2022).

Para K, a textura foi decisiva. No solo arenoso, a baixa retenção ampliou o efeito da forma de liberação. Por isso, OM.f. superou as demais fontes aos 90 DAAF no Neo. No Lato, a diferença entre tratamentos foi menor, pois a fração coloidal reduz o deslocamento do nutriente (Rosolem; Steiner, 2017; Barbosa *et al.*, 2024; Netto-Ferreira *et al.*, 2024).

Aos 150 DAAF, o efeito residual ficou claro. No Neo, os organominerais mantiveram maiores teores de P e K no horizonte superficial, o que indica suprimento por período mais longo em solo de baixa retenção. No Lato, o ganho maior ocorreu no complexo de troca: OM.f. elevou pH, Ca, soma de bases e saturação por bases e reduziu $H^+ + Al^{3+}$ e saturação por Al. Nesse solo, a vantagem do organomineral não esteve só na permanência do nutriente extraível, mas no ajuste do ambiente químico radicular (Moreira *et al.*, 2021; Benites *et al.*, 2022).

O comportamento do enxofre reforça essa leitura. Aos 90 DAAF, a fonte mineral concentrou os maiores teores no Neo, quadro compatível com maior prontidão de dissolução. Aos 150 dias, os organominerais passaram a manter os maiores valores nesse solo, sinal de oferta por período mais longo. No Lato, OM.f. sustentou os maiores teores nas duas últimas avaliações, o que indica menor perda da fração liberada.

A evolução de SB, V e T mostra que os organominerais não atuaram só como fonte de nutrientes. No Neo, o aumento de T sob OM.f. indica ganho funcional na retenção de cátions, ponto relevante em solo leve. No Lato, o aumento de SB e V confirma maior ocupação do complexo de troca por bases, com destaque para Ca^{2+} . A resposta residual, assim, envolveu oferta de nutrientes e melhoria do equilíbrio químico do solo.

Os indicadores de acidez confirmam esse padrão. O Neo apresentou maiores valores de Al^{3+} , $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ e m desde o início, quadro coerente com menor poder tampão. Aos 150 DAAF, OM.p. reduziu Al^{3+} e m no solo arenoso. No Lato, OM.f. reduziu $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ e suprimiu o Al^{3+} trocável. A forma física, portanto, modulou o tempo e o alcance das reações entre fertilizante e fase sólida.

Os micronutrientes responderam de modo menos uniforme. B, Fe e Mn variaram com o tempo e com a combinação entre solo e fonte. Cu e Zn acompanharam mais de perto o efeito do solo. Esse comportamento decorre da relação entre pH, matéria orgânica e retenção mineral. Por isso, a leitura desses elementos exige associação com a evolução da acidez e da fase trocável sem análise isolada.

A matéria orgânica do solo ficou sob controle pedológico, com valores mais altos no Neo em todos os tempos. Ainda assim, a baixa variação no teor total não reduz o papel da fração orgânica dos fertilizantes. Mesmo sem grande mudança no valor global, essa fração contribuiu para retenção de água, modulação da solução do solo e maior permanência de nutrientes, com efeito mais visível no ambiente de baixa capacidade tampão (Uddin *et al.*, 2024).

No conjunto, textura e forma física definiram o comportamento das fontes ao longo do tempo. A fonte mineral concentrou a liberação na fase inicial. Os organominerais distribuíram o suprimento e ampliaram o efeito residual. No Neo, isso resultou em maior permanência de P e K. No Lato, o ganho principal foi o ajuste do complexo de troca e da acidez. Essa diferença orienta a recomendação agrônômica em solos tropicais contrastantes.

4.1 Potencial hidrogeniônico em solução de cloreto de cálcio - pH CaCl_2

O pH em CaCl_2 acompanhou o contraste textural entre os solos. No Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, Neo, a menor capacidade de troca catiônica (CTC) e o menor poder tampão ampliaram a variação do equilíbrio ácido-base após a aplicação dos fertilizantes. No Latossolo Vermelho Distrófico típico, Lato, a maior fração coloidal e a

presença de óxidos limitaram essas oscilações e mantiveram maior estabilidade química do meio (Larney; Angers, 2012; Havlin *et al.*, 2013).

Aos 90 DAAF, a diferença entre os solos indica ajuste entre a solução e o complexo de troca, com redistribuição dos íons liberados pelas fontes. Nessa etapa, a fração orgânica dos organominerais passou a exercer papel mais claro, por liberar cátions ao longo do tempo e por fornecer grupos reativos capazes de sustentar o tamponamento do solo (Sá *et al.*, 2017; Benites *et al.*, 2022).

Aos 150 DAAF, a interação solo $\times$ fertilizante mostra que o efeito da fonte passou a depender do ambiente edáfico. No solo de menor poder tampão, a nitrificação do N da fonte mineral favoreceu a geração de H^+ e a manutenção de valores mais baixos de pH. Nas fontes organominerais, a mineralização da fração orgânica e a liberação gradual de bases reduziram esse efeito e sustentaram maior estabilidade do pH, com destaque para o organomineral farelado no Lato (Benites *et al.*, 2022; Uddin *et al.*, 2024).

4.2 Fósforo extraível pelo extrator Mehlich-1 - P Mehlich-1

A interação observada para o P extraível mostra que o resultado decorre do balanço entre solubilização da fonte e retenção pelo solo, com papel central da adsorção em superfícies reativas e da precipitação em ambientes tropicais (Sá *et al.*, 2017). O fertilizante mineral farelado eleva a concentração de P na solução logo após a aplicação. No solo argiloso, porém, essa fração é reduzida pela fixação em óxidos e hidróxidos, o que limita a persistência do nutriente extraível ao longo do tempo (Sá *et al.*, 2017; Frazão *et al.*, 2021).

Nos organominerais, a matriz de cama de frango altera a cinética de liberação e reduz a fixação inicial por competição por sítios de adsorção e por complexação de Fe e Al. Esse mecanismo ajuda a explicar a maior manutenção de P no Neo aos 90 e 150 DAAF. No Lato, o maior valor com M.f. aos 90 DAAF indica que a alta concentração inicial da fonte mineral ainda prevaleceu no período avaliado, mesmo sob maior reatividade do solo (Sá *et al.*, 2017; Benites *et al.*, 2022).

A forma física também interfere nesse processo. O farelado amplia a área de contato e acelera a dissolução. O peletizado reduz esse contato inicial e distribui a liberação no tempo. Mesmo sem separar as médias em todas as datas, essa diferença segue relevante, pois altera difusão, dissolução e permanência do P conforme a textura e o tempo de incubação (Frazão *et al.*, 2021; Espinoza *et al.*, 2023).

4.3 Potássio trocável - K^+

O K apresenta alta mobilidade e responde logo após a aplicação quando fornecido por fontes solúveis, como o cloreto de potássio. Em solo arenoso, a menor retenção no complexo de troca favorece redistribuição no perfil e amplia perdas, o que torna o Neo mais sujeito a variações temporais. No Lato, a maior capacidade de troca catiônica e a maior retenção amortecem essas oscilações (Rosolem; Steiner, 2017; Zörb *et al.*, 2014).

Nos organominerais, parte do K é ofertada de forma gradual pela combinação entre liberação da fração mineral e mineralização da fração orgânica. Esse padrão reduz picos de concentração e sustenta a disponibilidade nas avaliações posteriores (Sá *et al.*, 2017; Ndoung *et al.*, 2023).

Do ponto de vista do manejo, os resultados reforçam o uso de fontes com liberação distribuída e de ajustes na aplicação para reduzir perdas em solos arenosos. Essa leitura coincide com trabalhos sobre eficiência de uso do K em sistemas tropicais e com estudos sobre fertilizantes organominerais enriquecidos com esse nutriente (Rosolem; Steiner, 2017; Zörb *et al.*, 2014; Fachini *et al.*, 2021).

4.4 Cálcio e magnésio trocáveis - Ca^{2+} e Mg^{2+}

O predomínio do fator solo nas duas primeiras avaliações decorre do controle exercido por mineralogia, teor de argila e estoque de cargas sobre a distribuição dos cátions trocáveis (Rosolem; Steiner, 2017; Sparks, 2019). No Lato, os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} aos 15 e 90 DAAF indicam maior retenção no complexo de troca e menor oscilação no curto prazo. No Neo, a menor reserva de cargas restringiu a permanência desses cátions na fase trocável.

Aos 150 DAAF, o Ca^{2+} passou a responder ao fertilizante. O maior valor sob OM.f., seguido por OM.p. indica maior aporte ou maior permanência desse cátion nas formulações organominerais, quadro coerente com a liberação gradual de bases e com o efeito residual da matriz orgânica (Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022). Para Mg^{2+} , a baixa variação no período indica controle maior pelo estoque do solo e pela seletividade de troca do que pela fonte aplicada. Esse resultado mostra que o aumento de Mg^{2+} exige fontes com maior participação desse nutriente quando a correção do solo for o objetivo do manejo.

4.5 Enxofre disponível na forma sulfato - S SO_4^{2-}

O enxofre na forma sulfato apresenta dinâmica condicionada por textura, retenção e mineralização do enxofre orgânico (Scherer, 2009). Em solo arenoso, a maior percolação favorece o deslocamento do sulfato. Em solo argiloso, a retenção é maior, o que reduz perdas e sustenta a disponibilidade por mais tempo (Lehmann; Joseph, 2021).

As fontes minerais fornecem frações prontamente disponíveis. Os organominerais combinam uma parte solúvel com frações dependentes de mineralização, o que distribui a liberação de S por semanas ou meses (Wyngaard; Cabrera, 2015; Benites *et al.*, 2022). Em esterco de aves, uma parte do enxofre é liberada logo após a aplicação, enquanto outra passa à solução do solo de forma progressiva, sob influência da atividade microbiana e das condições edáficas (Wyngaard; Cabrera, 2015; Malik *et al.*, 2021).

Esse conjunto de processos é compatível com os resultados do experimento. Aos 90 DAAF, no Neo, o fertilizante mineral manteve o maior teor de S- SO_4^{2-} , o que indica liberação inicial mais concentrada. Aos 150 DAAF, os organominerais passaram a sustentar os maiores valores nesse solo, o que mostra efeito residual mais prolongado. No Lato, o OM.f. apresentou os maiores teores nas duas últimas avaliações, o que indica menor perda e maior permanência do sulfato na fase disponível (Sá *et al.*, 2017; Benites *et al.*, 2022).

4.6 Soma de bases e saturação por bases - SB e V

A soma de bases (SB) e a saturação por bases (V) expressam o grau de ocupação do complexo de troca por cátions básicos, com destaque para Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Por isso, acompanham o comportamento das bases trocáveis e a capacidade do solo de retê-las (Rosolem; Steiner, 2017; Sparks, 2019). No solo argiloso, a maior retenção sustenta SB e V mais altas. No arenoso, a menor capacidade de troca catiônica reduz a permanência dessas bases e amplia a dependência de fontes com liberação distribuída.

Aos 150 DAAF, o efeito do fertilizante confirma esse quadro. O organomineral farelado apresentou os maiores valores de SB e V, o peletizado ocupou posição intermediária e a fonte mineral ficou no menor patamar. Esse resultado indica que a fração orgânica favoreceu a retenção de cátions e reduziu perdas em solos com baixo poder tampão (Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022).

4.7 Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 - T

No Neo, a elevação de T aos 150 DAAF sob OM.f. e OM.p. indica ganho na retenção de cátions após a aplicação de fontes com matriz orgânica. Esse efeito decorre da adição de grupos reativos e da liberação gradual de bases, que ampliam a ocupação do complexo de troca e reduzem a instabilidade química do solo arenoso (Rosolem; Steiner, 2017; Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022).

No Lato, a resposta foi menor. A mineralogia e o estoque de cargas desse solo já sustentam alta retenção, o que limita alterações de T no intervalo avaliado. Assim, o efeito do fertilizante sobre essa variável foi mais nítido no solo arenoso que no argiloso.

4.8 Alumínio trocável, acidez potencial e saturação por alumínio - Al^{3+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e m

Na fase inicial, o solo definiu o comportamento de Al^{3+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e m. No Neo, a menor reserva de bases e a baixa retenção de cargas mantiveram maior Al na fase trocável e maior saturação por alumínio. No Lato, a maior fração argilosa e o maior estoque de cargas reduziram a expressão da acidez. Nessa etapa, o fertilizante ainda não havia alterado de forma ampla o equilíbrio entre bases e Al (Abreu *et al.*, 2003; Kochian *et al.*, 2004; Rosolem; Steiner, 2017; Sparks, 2019).

Na fase de transição, esse padrão foi mantido. No solo arenoso, a menor retenção de bases preservou maior sensibilidade à acidificação. No argiloso, a maior retenção de cátions limitou a mobilização de Al. Por isso, o Lato manteve menor risco de toxidez e menor pressão de acidez.

Na fase final, a interação entre solo e fonte mostrou o efeito acumulado dos fertilizantes. A entrada de bases deslocou Al^{3+} do complexo de troca, o que reduziu m. Ao mesmo tempo, a fração orgânica dos organominerais ligou parte desse Al, o que diminuiu sua atividade no solo e enfraqueceu $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$. Esse efeito teve maior peso no Neo, onde a condição química depende mais do manejo. Com menos Al ativo, o solo impõe menor restrição ao crescimento radicular e amplia o aproveitamento de nutrientes sensíveis à acidez (Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022).

4.9 Matéria orgânica do solo - MO

A matéria orgânica do solo funciona como reserva de C e interfere na qualidade química e biológica do sistema, por gerar cargas dependentes do pH, sustentar a microbiota e regular a mineralização de nutrientes (Mohanty *et al.*, 2013; Sheik *et al.*, 2023). Em intervalos curtos, variações expressivas no teor total de MO são pouco prováveis, pois o estoque de C responde em ritmo lento e depende de clima, textura, uso anterior do solo e qualidade do material incorporado (FAO, 2003; Mohanty *et al.*, 2013).

Mesmo sem aumento expressivo no teor total, a entrada de frações orgânicas via organominerais pode gerar efeitos funcionais antes de mudanças detectáveis na MO. O aporte de C lábil altera o ritmo de mineralização dos nutrientes e pode elevar a eficiência de uso dos fertilizantes. Avaliações em prazo mais longo, associadas a outros indicadores, capturam melhor esses efeitos cumulativos, com destaque para solos com menor estoque inicial (Liu *et al.*, 2025). Em sistemas agrícolas brasileiros, a relação entre C orgânico, manejo e ciclagem de nutrientes também aparece em estudos sobre sustentabilidade do sistema produtivo (Santos; Tømm, 2003).

4.10 Micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco - B, Cu, Fe, Mn e Zn

As respostas de B, Cu, Fe, Mn e Zn não seguiram um único padrão, o que indica controle conjunto de pH, textura, matéria orgânica e fonte. Cu e Zn ficaram mais ligados ao efeito do solo. Para Cu, os maiores teores no Lato aos 15 e 150 DAAF indicam maior retenção na fração coloidal. Para Zn, os valores mais altos no Neo ao longo do período mostram maior permanência na forma extraível nesse solo, com menor imobilização na matriz mais argilosa (Rutkowska *et al.*, 2014; EMBRAPA, 2021; Santos *et al.*, 2021).

Fe e Mn responderam com maior sensibilidade ao ambiente químico. O Fe foi muito mais alto no Neo que no Lato nas avaliações com interação, quadro coerente com maior solubilidade em condição mais ácida. O Mn também variou com a combinação entre solo e fertilizante aos 15 e 90 DAAF e, aos 150 dias, permaneceu maior no Neo, o que reforça a relação desses elementos com pH e forma química na solução do solo. Para B, a interação aos 90 e 150 DAAF mostra dependência da fonte e da textura, resultado compatível com a alta mobilidade do elemento e com maior risco de deslocamento em solo leve. No conjunto, Cu e

Zn responderam mais à retenção do solo; Fe, Mn e B, às alterações químicas geradas pelas fontes ao longo do tempo (Dhaliwal *et al.*, 2019; EMBRAPA, 2021; Matos *et al.*, 2024).

4.11 Implicações agronômicas

Em solo arenoso, organominerais com liberação gradual reduzem perdas iniciais e mantêm P e K disponíveis por mais tempo que a fonte mineral solúvel. Esse efeito é relevante em ambiente de baixa retenção, no qual a permanência do nutriente no horizonte superficial define maior eficiência de uso (Moreira *et al.*, 2021).

Em solo argiloso, o ganho imediato é menor, porque a própria matriz do solo já retém parte expressiva dos nutrientes, sobretudo P. Ainda assim, o organomineral mantém interesse agrônomo por associar reciclagem de resíduos, aporte de bases e efeito residual sobre a qualidade química do sistema (Sá *et al.*, 2017; Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022; Howe *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÕES

As avaliações nas fases inicial, de transição e final foram adequadas para distinguir disponibilidade do nutriente, ajuste do sistema e efeito residual em função da textura do solo.

O fertilizante mineral farelado concentrou a resposta de P e K na fase inicial. Os organominerais, farelado e peletizado, distribuíram a liberação no tempo e melhoraram o complexo de troca, com aumento da soma de bases, da saturação por bases e da capacidade de troca catiônica, além de redução de Al^{3+} , acidez potencial e saturação por Al, o que favoreceu o ambiente radicular em solos ácidos.

Os micronutrientes variaram conforme pH, matéria orgânica do solo e mineralogia. O teor total de matéria orgânica mudou pouco no intervalo avaliado.

Em Neossolos arenosos, recomenda-se priorizar organominerais peletizados e fracionar as aplicações. Em ambos os solos, fontes minerais atendem a demanda inicial, e fontes organominerais acrescentam efeito residual à nutrição das plantas. Os resultados sustentam o uso de organominerais para elevar a eficiência de uso de nutrientes e apoiar manejo mais sustentável em solos tropicais de texturas contrastantes.

REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 337-343, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000200019>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BARBOSA, N. S.; LUZ, M. S.; SOUSA, N. G.; SANTOS, K. G. Development and evaluation of slow-release organomineral phosphate fertilizer based on coffee waste. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 48, e018323, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202448018323>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- BENITES, V. M.; DAL MOLIN, S. J.; MENEZES, J. F. S.; GUIMARÃES, G. S.; MACHADO, P. L. O. de A. Organomineral fertilizer is an agronomic efficient alternative for poultry litter phosphorus recycling in an acidic Ferralsol. **Frontiers in Agronomy**, v. 4, 785753, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.785753>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Micronutrientes. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/sistema-plantio-direto/fundamentos/beneficios/ao-solo/quimica-do-solo/micronutrientes>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- ERENOĞLU, E. B.; MORSY, M. M.; DÜNDAR, Ş. The effect of organomineral fertilizer phosphorus on the availability of phosphorus in a calcareous soil. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 21, n. 5, p. 4545-4562, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.15666/aeer/2105_45454562. Acesso em: 18 jan. 2026.
- ESPINOZA, A. L. F.; RANIRO, H. R.; LEITE, C. N.; PAVINATO, P. S. Physico-chemical properties and phosphorus solubilization of organomineral fertilizers derived from sewage sludge. **Soil Systems**, v. 7, n. 4, 100, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040100>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- FACHINI, J.; FIGUEIREDO, C. C.; VALE, A. T.; JINDO, K. Novel K-enriched organomineral fertilizer from sewage sludge-biochar: chemical, physical and mineralogical characterization. **Waste Management**, v. 135, p. 98-108, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.027>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- FRAZÃO, J. J.; BENITES, V. M.; PIEROBON, V. M.; RIBEIRO, J. V. S.; LAVRES, J. A. A poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer has higher agronomic effectiveness than conventional phosphate fertilizer applied to field-grown maize and soybean. **Sustainability**, v. 13, n. 21, 11635, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111635>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 8. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2013. 528 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Soil_Fertility_and_Fertilizers.html?id=hV8rAAAAQBAJ. Acesso em: 18 jan. 2026.

HOWE, J. A.; MCDONALD, M. D.; BURKE, J.; ROBERTSON, I.; COKER, H.; et al. Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: a review. **Soil Security**, v. 16, 100155, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100155>. Acesso em: 18 jan. 2026.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 459-493, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>. Acesso em: 18 jan. 2026.

LARNEY, F. J.; ANGERS, D. A. The role of organic amendments in soil reclamation: a review. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 92, n. 1, p. 19-38, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/CJSS2010-064>. Acesso em: 18 jan. 2026.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780203762264>. Acesso em: 18 jan. 2026.

LI, K.; LU, H.; NKOH, J. N.; HONG, Z.; XU, R. Aluminum mobilization as influenced by soil organic matter during soil and mineral acidification: a constant pH study. **Geoderma**, v. 418, 115853, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115853>. Acesso em: 18 jan. 2026.

LIU, T.; WU, L.; TANG, S.; SHAABAN, M.; MENG, L.; et al. Positive effects of amendments on crop yield and organic carbon in sandy soils are regulated by aridity: a global meta-analysis. **Geoderma**, v. 462, 117540, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117540>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MALIK, K. M.; KHAN, K. S.; BILLAH, M.; AKHTAR, M. S.; RUKH, S.; et al. Organic amendments and elemental sulfur stimulate microbial biomass and sulfur oxidation in alkaline subtropical soils. **Agronomy**, v. 11, n. 12, 2514, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122514>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MATOS, C. H. L.; MONTENEGRO, R. A.; UCHÔA, S. C. P.; VALE JÚNIOR, J. F.; SABÓIA, V. H. C.; et al. Soil micronutrients: dynamics, availability, and fertilization management. In: **Biological and agricultural sciences: theory and practice**. [S. l.]: Seven Editora, 2024. p. 60-79. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/sevened2024.008-007>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MOHANTY, M.; SINHA, N. K.; REDDY, K. S.; CHAUDHARY, R. S.; SUBBA RAO, A.; et al. How important is the quality of organic amendments in relation to mineral N availability in soils? **Agricultural Research**, v. 2, p. 99-110, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40003-013-0052-z>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MOREIRA, J. G.; DELVAUX, J. C.; MAGELA, M. L. M.; PEREIRA, V. J.; CAMARGO, R.; et al. Chemical changes in soil with use of pelletized organomineral fertilizer made from biosolids and sugarcane filter cake. **Australian Journal of Crop Science**, v. 15, n. 1, p. 67-72, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.01.2645>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MUMBACH, G. L.; GATIBONI, L. C.; BONA, F. D.; SCHMITT, D. E.; CORRÊA, J. C.; et al. Agronomic efficiency of organomineral fertilizer in sequential grain crops in southern

Brazil. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 3037-3049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20238>. Acesso em: 18 jan. 2026.

NDOUNG, O. C. N.; SOUZA, L. R.; FACHINI, J.; LEÃO, T. P.; SANDRI, D.; et al. Dynamics of potassium released from sewage sludge biochar fertilizers in soil. **Journal of Environmental Management**, v. 346, 119057, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119057>. Acesso em: 18 jan. 2026.

NETTO-FERREIRA, J. B.; GABETTO, F. P.; ARAUJO, A. C. M.; DIAS, R. C.; MALTAIS-LANDRY, G.; et al. Granulated fertilizers are more efficient in reducing potassium leaching losses than combining biosolids with inorganic sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0230103, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230103>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=autoria%3A%22ALVAREZ+V.%2C+V.H.+%28Ed.%29.%22&id=324081&paginaAtual=1&paginacao=t&qFacets=autoria%3A%22ALVAREZ+V.%2C+V.H.+%28Ed.%29.%22&sort=>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RODRIGUES, M. M.; VIANA, D. G.; OLIVEIRA, F. C.; ALVES, M. C.; REGITANO, J. B. Sewage sludge as organic matrix in the manufacture of organomineral fertilizers: physical forms, environmental risks, and nutrients recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, 127774, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127774>. Acesso em: 18 jan. 2026.

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 658-666, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RUTKOWSKA, B.; SZULC, W.; SOSULSKI, T.; STĘPIŃ, W. Soil micronutrient availability to crops affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications. **Plant, Soil and Environment**, v. 60, n. 5, p. 198-203, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.17221/914/2013-PSE>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SÁ, J. M. E.; JANTALIA, C. P.; TEIXEIRA, P. C.; POLIDORO, J. C.; BENITES, V. M.; et al. Agronomic and P recovery efficiency of organomineral phosphate fertilizer from poultry litter in sandy and clayey soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 52, n. 9, p. 794-805, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900011>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SANTOS, F. D.; FANTINEL, R. A.; WEILER, E. B.; CRUZ, J. C. Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 2, p. 272-278, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v25i2.15552>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 477-486, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000300013>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.11>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SCHERER, H. W. Sulfur in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 326-335, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.200900037>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SHEIK, M. A.; RAJONEE, A. A. Effects of organic amendments on soil pH, moisture content and organic carbon in an agricultural soil. **Barishal University Journal of Biological Sciences**, v. 2, p. 51-56, 2023. Disponível em: <https://bu.ac.bd/oldwebsite/uploads/BUJBSV2D2023/05.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003. 352 p. ISBN 978-0-12-656446-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780126564464/environmental-soil-chemistry>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SWIFY, S.; MAŽEIK, R.; VOLUNGEVIČIUS, J. Mineral nitrogen release patterns in various soil and texture types and the impact of urea and coated urea potassium humate on barley biomass. **Soil Systems**, v. 7, n. 4, 102, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040102>. Acesso em: 18 jan. 2026.

UDDIN, M. K.; SAHA, B. K.; WONG, V. N. L.; PATTI, A. F. Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: a comprehensive review. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 127433, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127433>. Acesso em: 18 jan. 2026.

WYNGAARD, N.; CABRERA, M. L. Measuring and estimating sulfur mineralization potential in soils amended with poultry litter or inorganic fertilizer. **Biology and Fertility of Soils**, v. 51, p. 545-554, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1000-9>. Acesso em: 18 jan. 2026.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture: status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 9, p. 656-669, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CAPÍTULO 3

Efeitos de fertilizantes organominerais e minerais na fertilidade do solo, desempenho biométrico, atividade enzimática e produtividade do cafeeiro

RESUMO

Avaliaram-se respostas de *Coffea arabica* L., cv. Acaiá, a três fontes de adubação, uma mineral convencional e duas organominerais, formuladas com esterco de frango e torta de filtro associadas a quatro doses de um composto de rejeito de frango (2, 4, 6 e 8 t ha⁻¹). O experimento foi conduzido em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 × 4, com quatro repetições. Aos 3 meses após o plantio (MPP), determinaram-se P, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, soma de bases, saturação por bases, pH, capacidade de troca catiônica, acidez potencial e matéria orgânica. Aos 3 e 12 MPP, mensuraram-se altura de planta, diâmetro de caule, diâmetro de copa e número de ramos plagiotrópicos. Aos 31 MPP, quantificaram-se proteínas solúveis totais, peroxidase, catalase, superóxido dismutase, peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio. A produção da primeira colheita foi estimada, e os dados foram submetidos à análise de variância, teste de Tukey e regressão. O organomineral à base de esterco de frango elevou P e bases trocáveis no início do ciclo, sem aumento de Al³⁺ em forma tóxica. O organomineral à base de torta de filtro favoreceu maior diâmetro de caule e maior emissão de ramos plagiotrópicos, enquanto a fonte à base de esterco de frango promoveu maior altura de planta. No plano bioquímico, doses entre 4 e 6 t ha⁻¹ reforçaram o sistema antioxidante, com respostas distintas de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica entre as matrizes. A produção aumentou linearmente com a dose do composto, com acréscimo estimado de 308,3 kg ha⁻¹ de grãos por tonelada aplicada. Conclui-se que a combinação entre fontes organominerais e doses ajustadas do composto orgânico melhora a disponibilidade de nutrientes, fortalece o estabelecimento das plantas, ajusta o estado redox e amplia o rendimento inicial da lavoura.

Palavras-chave: Reciclagem de nutrientes. Estado redox. Vigor inicial. Resposta dose-dependente. Rejeito de frango. Fósforo disponível.

ABSTRACT

Responses of *Coffea arabica* L., cv. Acaia, were evaluated under three fertilizer sources, one conventional mineral source and two organomineral sources based on poultry manure and filter cake, combined with four rates of an organic compound derived from poultry waste (2, 4, 6, and 8 t ha⁻¹). The experiment followed a randomized complete block design in a 3 × 4 factorial scheme with four replications. At 3 months after planting (MPP), P, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, sum of bases, base saturation, pH, cation exchange capacity, potential acidity, and organic matter were determined. At 3 and 12 MPP, plant height, stem diameter, canopy diameter, and number of plagiotropic branches were recorded. At 31 MPP, total soluble proteins, peroxidase, catalase, superoxide dismutase, lipid peroxidation, and H₂O₂ were quantified. First-harvest yield was estimated, and data were subjected to analysis of variance, Tukey's test, and regression analysis. The poultry-manure organomineral increased P and exchangeable bases early in the cycle, without raising toxic Al³⁺. The filter-cake organomineral favored stem thickening and plagiotropic branching, whereas the poultry-manure source promoted greater plant height. At the biochemical level, rates between 4 and 6 t ha⁻¹ strengthened the antioxidant system, with contrasting responses of H₂O₂ and lipid peroxidation between organic matrices. Yield increased linearly with the organic-compound rate, with an estimated gain of 308.3 kg ha⁻¹ of coffee beans per ton applied. It is concluded that combining organomineral sources with adjusted rates of the organic compound improves nutrient availability, strengthens plant establishment, enhances redox adjustment, and increases early yield.

Keywords: Nutrient recycling. Redox balance. Early vigor. Dose–response. Poultry waste. Phosphorus availability.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura enfrenta o desafio de conciliar produtividade, sustentabilidade e maior eficiência no manejo de nutrientes, porque falhas na adubação reduzem o aproveitamento dos fertilizantes e ampliam perdas ambientais e econômicas. Nesse contexto, fertilizantes organominerais passaram a receber atenção por modularem a liberação de nutrientes, elevarem a eficiência agrônômica e influenciarem a microbiota do solo, com reflexos sobre o crescimento vegetativo e a produção (Martínez-Dalmau *et al.*, 2021; Freitas *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023; Teixeira; Delú, 2024).

A resposta do cafeeiro a essas fontes não pode ser interpretada apenas por atributos químicos do solo. É necessário integrar variáveis biométricas e bioquímicas. Entre os indicadores bioquímicos, as proteínas solúveis totais (PST) refletem o estado metabólico e nutricional e aumentam quando o suprimento de nutrientes é adequado, indicando maior capacidade fotossintética. Em sentido oposto, desequilíbrios nutricionais ativam o sistema antioxidante, com aumento da atividade de superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POD), em resposta ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Reis *et al.*, 2015; Gupta *et al.*, 2024).

Entre essas espécies, o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) ocupa posição central. Em concentração moderada, atua na sinalização redox e no ajuste metabólico. Em excesso, intensifica danos em membranas, proteínas e ácidos nucleicos. A peroxidação lipídica, estimada por malondialdeído, expressa esse dano. Assim, a leitura conjunta de PST, H_2O_2 , peroxidação lipídica e enzimas antioxidantes permite avaliar se a fonte nutricional favorece crescimento com menor custo fisiológico para a planta (Reis *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2024).

Além disso, altura, diâmetro de caule, diâmetro de copa e número de ramos plagiotrópicos traduzem o efeito do manejo sobre a formação da planta e sobre o potencial produtivo inicial. Quando essas variáveis são analisadas em conjunto com os marcadores bioquímicos, torna-se possível ligar suprimento de nutrientes, ajuste metabólico e desempenho agrônômico do cafeeiro (da Matta *et al.*, 2007; Reis *et al.*, 2015).

Diante disso, este estudo avaliou fertilizantes mineral e organominerais de origem animal e vegetal, em associação com doses de composto orgânico, relacionando atributos químicos do solo, crescimento, atividade antioxidante e produtividade de *Coffea arabica* L. A hipótese foi que a natureza da fonte e a dose do composto alteram a disponibilidade de nutrientes e o estado redox da planta, com reflexos mensuráveis na arquitetura e na produção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental e cultivar

O experimento foi conduzido de outubro de 2022 a junho de 2025, na Fazenda Furnas, em Indianópolis, Minas Gerais, nas coordenadas 18°56'08" S e 47°56'11" W, a 911 m de altitude. O clima regional é Aw, com verão chuvoso e inverno seco.

A localização da área experimental é apresentada na Figura 3.

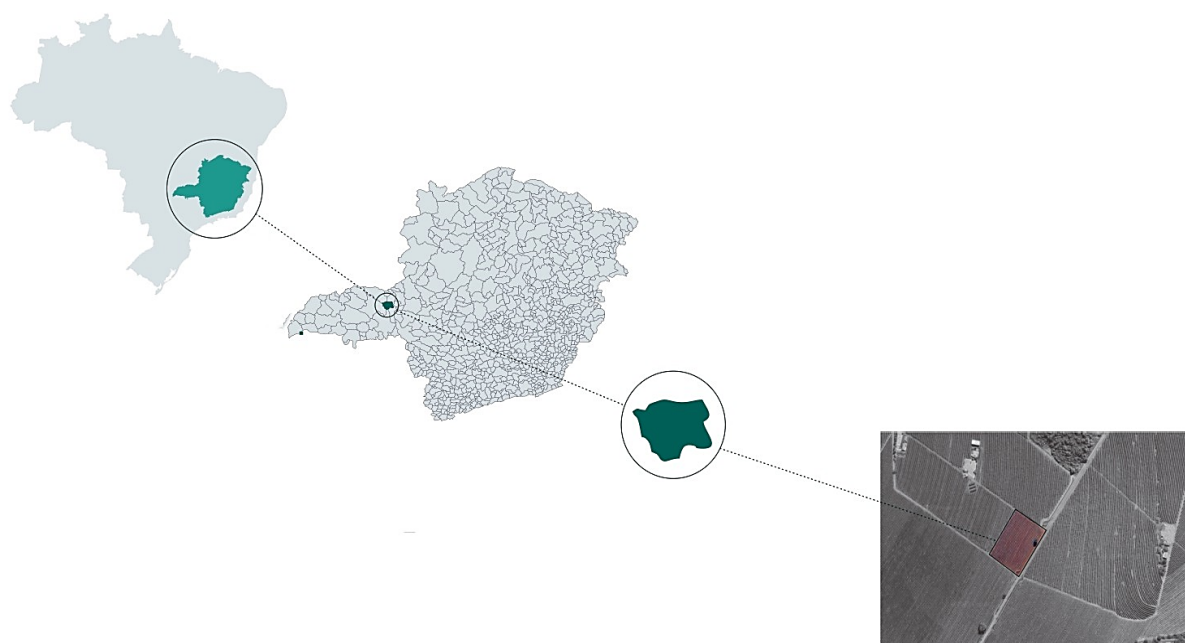


Figura 3 - Localização do experimento no município de Indianópolis, Minas Gerais.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3 mostra o município de Indianópolis no contexto estadual e a posição da área do ensaio dentro da propriedade.

A caracterização física e química do solo da área experimental, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, é apresentada na Tabela 7. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, de textura argilosa, conforme EMBRAPA (2018). As análises granulométricas foram realizadas no Laboratório de Manejo do Solo da Universidade Federal de Uberlândia, e as análises químicas, no laboratório Safrar Análises Agrícolas, em Uberlândia, MG.

Tabela 7 - Propriedades físicas e químicas do solo em duas profundidades.

(a) Atributos químicos

Profundidade	pH	P _{Mehl.1}	P _{Res.}	K ⁺	S-SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺
cm	H ₂ O	mg dm ⁻³				cmol _c .dm ⁻³				
0-20	5,5	17,1	55,2	131	36	0,3	4,0	1,5	0,0	4,2
20-40	5,8	9,5	53,0	90	25	0,2	3,2	1,1	0,0	3,8

(b) Matéria orgânica, complexos de troca e micronutrientes

Profundidade	MO	SB	t	T	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	dag.kg ⁻¹	cmol _c .dm ⁻³			%	mg.dm ⁻³				
0-20	3,2	5,8	5,8	10,0	58,0	0,6	5,2	31,0	2,5	2,8
20-40	0,9	4,5	4,5	8,3	54,3	0,5	4,5	28,0	2,0	2,2

(c) Granulometria

Profundidade	Areia	Silte	Argila
cm	g Kg ⁻¹		
0-20	321	191	488
20-40	412	220	368

Metodologias: Areia, silte e argila determinados pelo método da pipeta (agitação lenta); pH em solução aquosa (1:2,5); P_{Res.}: resina catiônica; P_{Mehl.1} e K disponível (extrator Mehlich-1 - HCL 0.05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0.0125 mol L⁻¹); S-SO₄ (fosfato monobásico, Ca: 0.00125 mol L⁻¹); Ca, Mg, Al trocável (KCl 1 mol L⁻¹); H⁺+Al³⁺: acidez potencial (solução tampão SMP a pH 7.5); M.O.: matéria orgânica (método colorimétrico); SB: soma de bases; t: capacidade de troca catiônica efetiva; T: capacidade de troca catiônica a pH 7.0; V: saturação por bases; B: (BaCl₂.2H₂O 0.0125% à quente); Cu, Fe, Mn: (DTPA 0.005 mol L⁻¹ + TEA 0.1 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹ a pH 7.3) (EMBRAPA, 1997).

A Tabela 7 mostra predomínio da fração argila, pH ácido, ausência de Al³⁺ trocável nas duas profundidades e maiores teores de MO, P e bases na camada de 0-20 cm. Esse quadro indica melhor condição química na superfície e justifica o acompanhamento do efeito das fontes fertilizantes sobre acidez, bases trocáveis e disponibilidade de nutrientes.

O material vegetal utilizado foi *Coffea arabica* L., cv. Acaiá (IAC 474-19), seleção de Mundo Novo, derivada do cruzamento entre Typica e Bourbon. A cultivar apresenta porte alto, vigor vegetativo e sistema radicular profundo, características que ampliam a exploração do solo e exigem manejo nutricional ajustado às fases de crescimento.

2.2 Delineamento experimental

O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 × 4, com 12 tratamentos. O primeiro fator reuniu três fontes fertilizantes: organomineral à base de esterco de frango (OMef), organomineral à base de torta de filtro (OMtf) e fertilizante mineral convencional. O segundo fator correspondeu a quatro doses do fertilizante orgânico formulado com rejeito de frango: 2, 4, 6 e 8 t ha⁻¹. Cada tratamento contou com quatro repetições, totalizando 48 parcelas. Cada parcela continha oito plantas, e a área útil correspondeu às quatro plantas centrais.

Os teores garantidos das fontes empregadas no ensaio estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição dos fertilizantes organominerais (OM) e fertilizante mineral.

Fertilizante	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Zn
	%							
Mineral	11,0	52,0	-	-	-	-	-	-
OM - esterco de frango	6,0	30,0	-	-	-	3,0	0,2	0,1
OM - torta de filtro	6,0	30,0	-	-	-	-	-	-
Orgânico - rejeito de frango	1,5	2,5	0,8	4,0	1,0	1,0	-	-

Legenda: Forma física: mineral: granulado, organomineral à base de esterco de frango: farelado, organomineral de torta de filtro: peletizado, orgânico composto por rejeito de frango: farelado.

Fonte: Os fabricantes.

A Tabela 8 mostra que a fonte mineral concentrou maiores teores de N e P₂O₅. O OMef agregou S, B e Zn. O fertilizante orgânico de rejeito de frango adicionou K₂O, Ca, Mg e S, o que amplia seu potencial de fornecimento ao solo.

Os atributos químicos das matrizes orgânicas usadas nas fontes fertilizantes estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química das matrizes orgânicas dos fertilizantes.

Fertilizante	pH	Umidade	C/N	COT	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		%		g kg ⁻¹			
OM - esterco de frango	8,0	25,0	10,1:1	337,5	33,5	38,5	8,8
OM - torta de filtro	7,5	70,0	11,0:1	296,0	27,0	33,4	<L.Q.
Orgânico - rejeito de frango	7,3	20,0	6,4:1	285,0	44,4	21,5	67,5

Valores referem-se ao fertilizante *in natura*. pH: suspensão aquosa 1:2,5 v/v. Umidade (%): método gravimétrico com secagem em estufa a 65 °C até peso constante. Relação C:N: carbono orgânico total (COT) - determinado por combustão seca, e nitrogênio total (N) determinado por digestão sulfúrica e espectrofotometria UV-Vis. P₂O₅ total (%): digestão nitroperclórica e análise por espectrofotometria de absorção atômica. K₂O solúvel em água (%): extração aquosa e quantificação por espectrofotometria de emissão de chama. L.Q.: limite de quantificação variou de 0,1 a 67%. Metodologias: MAPA (2017); AOAC (2007).

A Tabela 9 indica que a cama de frango apresentou maior teor de N e valor de P₂O₅ próximo ao da torta de filtro. A torta de filtro mostrou alta umidade, condição que interfere no armazenamento e na aplicação. O fertilizante orgânico formulado com rejeito de frango reuniu maior teor de N e de K₂O solúvel, o que indica rápida decomposição e alto potencial de fornecimento de nutrientes.

As fontes orgânicas derivaram de resíduos animais e vegetais. Essa origem amplia a heterogeneidade do material, mas também agrega efeitos sobre retenção de água, condição física do solo e atividade microbiana.

Na fabricação do fertilizante mineral e dos organominerais foram utilizados ureia, fosfato monoamônico e cloreto de potássio. As doses seguiram a exigência nutricional do cafeeiro, a produtividade esperada e a disponibilidade inicial de nutrientes no solo. A aplicação foi realizada em dose única na área experimental.

2.3 Manejo da safra

O cafezal foi implantado em outubro de 2022, após gradagem do solo a 25 cm e incorporação de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, 4 L m⁻² de palha de café e dos fertilizantes dos tratamentos. O plantio das mudas ocorreu 40 dias após essa operação, intervalo que favoreceu a incorporação dos nutrientes e a estabilização do pH. Em janeiro, realizou-se adubação de cobertura com AMIORGAN®, na dose de 5 g planta⁻¹, com 16% de N, 17% de S e 3% de K₂O.

Adotou-se espaçamento de 3,8 m entre linhas e 0,6 m entre plantas, totalizando 4.385 plantas ha⁻¹. Durante o período experimental, foram executados irrigação por gotejamento, capinas, controle fitossanitário e adubações complementares, assegurando condições adequadas ao desenvolvimento do cafeeiro em formação.

2.4 Metodologias

2.4.1 Análise de solo

As avaliações foram realizadas aos 3 meses após o plantio (MPP), conforme Afrizal *et al.* (2023), para examinar as interações químicas das fontes fertilizantes no solo, com foco em pH e disponibilidade de P.

As amostras foram coletadas com trado na camada de 0-20 cm, ao longo da linha de plantio entre as quatro plantas centrais de cada parcela. Em seguida, as subamostras foram reunidas e homogeneizadas, formando uma amostra representativa de cada bloco.

Após a identificação, o material foi encaminhado ao Laboratório Safrar Análises Agrícolas. A determinação dos macronutrientes seguiu o protocolo de Bataglia *et al.* (1983).

2.4.2 Características biométricas das plantas

As avaliações biométricas ocorreram aos 3 e 12 meses após o plantio (MPP), conforme Bravin *et al.* (2020) para acompanhar o estabelecimento e a evolução das plantas.

A altura foi medida do nível do solo até a gema terminal, com régua graduada. O diâmetro do caule foi obtido com paquímetro, a 2 cm da superfície do solo. O diâmetro da copa correspondeu à média dos dois ramos mais longos no sentido das entrelinhas. O número

de ramos plagiotrópicos foi determinado pela contagem dos pares desde a base até a gema terminal.

2.4.3 Componentes biológicos e antioxidantes bioativos

As análises fisiológicas e bioquímicas foram realizadas em folhas do terço médio, totalmente expandidas e em estado funcional ativo. A coleta ocorreu no período da manhã, para reduzir interferências ambientais imediatas, e o material foi congelado em nitrogênio líquido logo após a retirada, conforme Freitas *et al.* (2024).

A amostragem foi feita em maio de 2025, antes da primeira colheita efetiva. A colheita de cata não foi adotada por não representar a produtividade do experimento. Esse critério assegurou maior uniformidade fisiológica do material foliar e maior consistência nas determinações enzimáticas.

2.4.4 Proteínas solúveis totais - PST

A quantificação de proteínas solúveis totais (PST) seguiu o método de Bradford (1976). O material foliar foi homogeneizado em tampão fosfato de potássio ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$; pH 6,8) e centrifugado a 10.000 rpm por 30 min, a 4°C . O sobrenadante reagiu com o corante de Bradford, e a absorbância foi lida a 595 nm. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g mL}^{-1}$ de extrato.

2.4.5 Peroxidase - POD

A atividade de peroxidase (POD) foi determinada conforme Teisseire e Guy (2000). O extrato foi obtido em tampão fosfato de potássio (50 mM; pH 6,5) e centrifugado a 10.000 rpm por 30 min, a 4°C . A reação continha pirogalol (20 mM) e H_2O_2 (5 mM), com incubação a 25°C por 5 min. A formação de purpurogalina foi acompanhada a 430 nm, e a atividade enzimática foi calculada com coeficiente de extinção molar de $2,5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, sendo expressa em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína.

2.4.6 Catalase - CAT

A atividade da catalase (CAT) foi avaliada conforme Peixoto *et al.* (1999). O extrato foi preparado em tampão fosfato de sódio (50 mM; pH 7,0) e centrifugado a 10.000 rpm por 30 min, a 4 °C. Em seguida foi adicionado à solução com H₂O₂ (12,5 mM), e a variação da absorbância foi monitorada a 240 nm. A atividade foi expressa em nmol H₂O₂ min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

2.4.7 Superóxido Dismutase - SOD

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada segundo Beauchamp e Fridovich (1971), com adaptações de Bor *et al.* (2003). As folhas, maceradas em N₂ líquido, foram homogeneizadas em tampão fosfato de sódio (pH 7,8) e centrifugadas a 10.000 rpm por 30 min, a 4 °C. A mistura reacional continha *nitroblue tetrazolium* (NBT), ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA), metionina e riboflavina. A atividade foi estimada pela inibição da redução do NBT, com leitura a 560 nm. Uma unidade enzimática correspondeu à quantidade necessária para inibir 50% dessa redução, e os resultados foram expressos em U mg⁻¹ de proteína.

2.4.8 Peroxidação lipídica - PL

A peroxidação lipídica (PL) foi estimada pelo método de Heath e Packer (1968), com quantificação de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS). Folhas de 200 mg foram homogeneizadas em solução de ácido tricloroacético a 10% com ácido tiobarbitúrico a 0,25%, incubadas a 90 °C por 1 h, resfriadas e centrifugadas a 10.000 g por 15 min. A absorbância do sobrenadante foi medida a 560 e 600 nm. O cálculo foi feito com base no coeficiente de extinção molar do malondialdeído, e os resultados foram expressos em nmol g⁻¹ de matéria fresca.

2.4.9 Peróxido de hidrogênio - H₂O₂

A quantificação de H₂O₂ seguiu Alexieva *et al.* (2001). Amostras de 200 mg de folhas foram trituradas em ácido tricloroacético a 0,1% e centrifugadas a 9.700 rpm por 15 min, a 4 °C. O sobrenadante foi misturado a tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) e iodeto de

potássio 1 M. A leitura foi feita a 390 nm, e os resultados foram expressos em $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria fresca.

2.4.10 Produtividade

A colheita dos frutos foi realizada manualmente em maio de 2025, abrangendo todos os estádios de maturação. Para evitar perdas utilizou-se pano de colheita sob a copa, seguido de limpeza manual para retirada de folhas e galhos (Chitarra; Chitarra, 2005). O volume foi medido em baldes graduados, e a massa foi determinada segundo Veiga *et al.* (2011). A produtividade, em kg ha^{-1} , foi estimada a partir do peso total obtido na área útil, com extrapolação para 4.385 plantas ha^{-1} .

2.4.11 Análise estatística

Os valores extremos foram identificados por boxplots dos resíduos no software SPSS Statistics®, conforme Chambers *et al.* (1983). Quando detectados, foram tratados como perdas de parcela e substituídos por estimativas obtidas pelo método da soma mínima dos quadrados dos resíduos. Em cada substituição, removeu-se um grau de liberdade do erro experimental (Gomes; Garcia, 2002).

A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se $p > 0,01$. Atendidas as premissas, a análise de variância foi realizada no SISVAR®, em delineamento em blocos casualizados, no esquema fatorial 3×4 . Quando houve efeito significativo, o fator fertilizante foi comparado pelo teste de Tukey, e o fator dose, por análise de regressão, adotando $p \leq 0,05$ para o coeficiente “a” e $R^2 \geq 60\%$. Os gráficos foram elaborados no SigmaPlot®.

3 RESULTADOS

3.1.1 Variáveis químicas do solo

A análise de variância das variáveis químicas do solo aos 3 meses após o plantio (3 MPP) está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de variância, estatística de Fisher calculada Fc, de variáveis químicas do solo aos 3 meses após o plantio do cafeeiro.

F.V.	g.l.	pH CaCl_2	P $_{\text{Meh-1}}$	K	Ca	Mg	SB
Fertilizante (F)	2	2,868 ^{ns}	0,526 ^{ns}	1,531 ^{ns}	2,114 ^{ns}	0,433 ^{ns}	1,729 ^{ns}
Dose (D)	3	0,645 ^{ns}	6,800 ^{**}	0,468 ^{ns}	2,437 ^{ns}	3,133 [*]	2,351 ^{ns}
F*D	6	1,672 ^{ns}	3,817 ^{**}	1,055 ^{ns}	4,514 ^{**}	1,395 ^{ns}	3,724 ^{**}
bloco	3	0,330 ^{ns}	0,822 ^{ns}	1,702 ^{ns}	1,563 ^{ns}	2,416 ^{ns}	1,376 ^{ns}
erro	33						
		V	T	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	m	M.O.
Fertilizante (F)	2	2,437 ^{ns}	1,098 ^{ns}	0	0,202 ^{ns}	0	0,243 ^{ns}
Dose (D)	3	1,870 ^{ns}	1,963 ^{ns}	0	0,009 ^{ns}	0	0,832 ^{ns}
F*D	6	5,430 ^{**}	2,363 ^{ns}	0	1,319 ^{ns}	0	0,876 ^{ns}
bloco	3	2,192 ^{ns}	1,246 ^{ns}	0	0,084 ^{ns}	0	0,334 ^{ns}
erro	33						

Legenda: F.V.: fonte de variação. g.l.: graus de liberdade. F: fertilizante. D: dose. F×D: interação *: significativo a 5% de probabilidade. **: significativo a 1% de probabilidade. ns: não significativo.

Metodologias: pH em CaCl_2 0,01 M; P e K disponíveis por Mehlich-1; Ca, Mg e Al disponíveis; SB: soma de bases; V: saturação por bases; T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; H⁺+Al³⁺: acidez potencial; m: saturação por Al³⁺; M.O.: matéria orgânica.

Observa-se interação significativa entre fonte fertilizante e dose para P, Ca, SB e V. O teor de Mg respondeu apenas à dose do fertilizante orgânico. Não foi detectado Al³⁺ em forma tóxica, nem alteração na saturação por alumínio.

O teor de P no solo, extraído por Mehlich-1, para as fontes mineral e organomineral à base de esterco de frango (OMef), em função das doses do fertilizante orgânico, está apresentado na Figura 4.

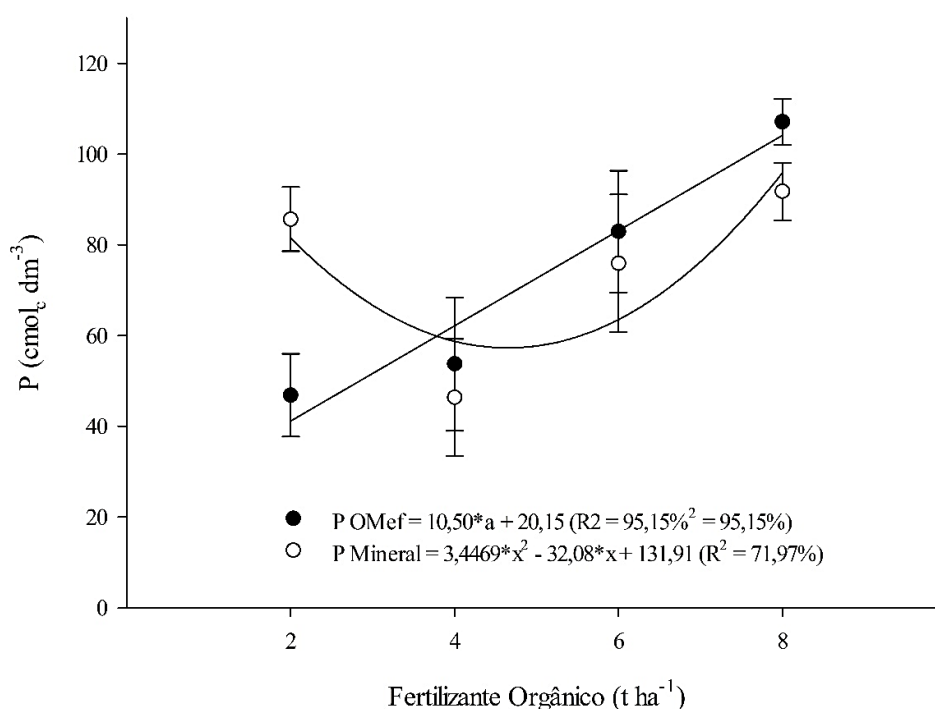


Figura 4 - P no solo (Mehlich-1).

Legenda: Teores de P (mg dm^{-3}) avaliados aos 3 meses após o plantio (MAP), na camada 0–20 cm, em função da dose de fertilizante orgânico (rejeito de frango; 2, 4, 6 e 8 t ha^{-1}) e da fonte de fertilizante (Mineral vs. OMef). OMef = organomineral à base de esterco de frango. Linhas representam regressões ajustadas; equações e R^2 estão apresentados no gráfico. Barras de erro representam o erro associado às médias.

Para a fonte mineral e para OMef, o teor de P ajustou-se aos modelos de regressão, com R^2 igual ou superior a 60%. Na fonte mineral, o aumento ocorreu a partir de 4,65 t ha^{-1} de fertilizante orgânico. Em OMef, houve incremento de 10,50 mg dm^{-3} de P por tonelada aplicada. Para OMtf, as doses de 2, 4, 6 e 8 t ha^{-1} não diferiram pelo teste de Tukey, com variação de 53,55 a 83,53 mg dm^{-3} .

Os teores de Ca^{2+} , SB e V no solo, para a fonte OMef em função das doses do fertilizante orgânico, estão apresentados na Figura 5.

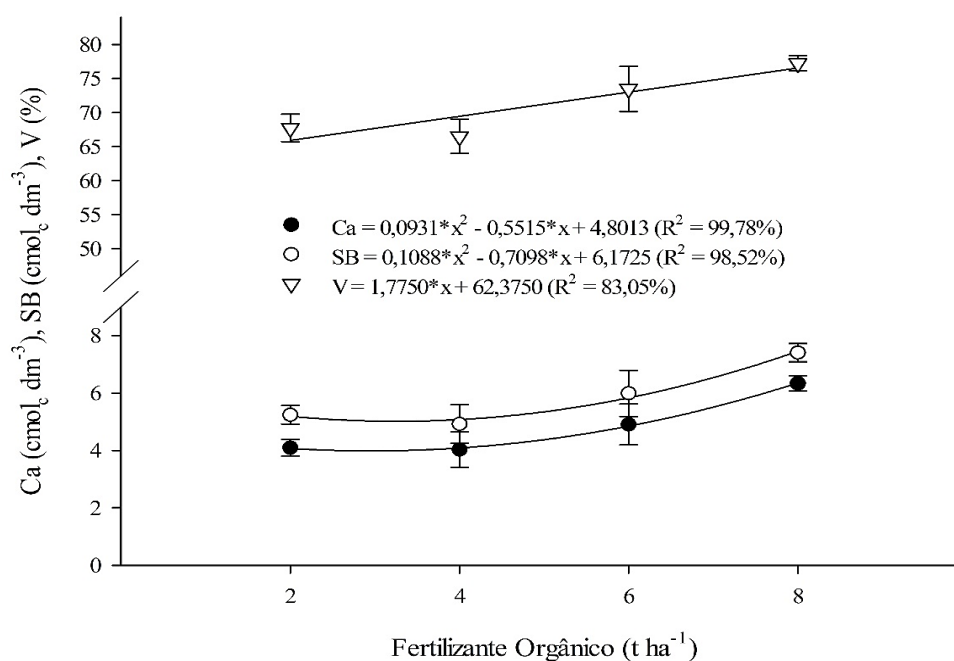


Figura 5 - Ca, SB e V vs. dose (OMef).

Legenda: Ca e SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e V (%) em função da dose de fertilizante orgânico (2–8 t ha^{-1}) sob OMef (organomineral à base de esterco de frango). Regressões e R^2 no gráfico. Barras de erro: variabilidade associada às médias.

Para OMef, Ca^{2+} e SB apresentaram ajuste quadrático, com aumento a partir de 2,96 e 3,26 t ha^{-1} de fertilizante orgânico, nessa ordem. A saturação por bases aumentou de forma linear, com incremento de 1,775% para cada tonelada de fertilizante orgânico aplicada.

A comparação de Ca^{2+} , SB e V entre a fonte mineral e OMtf, nas doses do fertilizante orgânico, está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Ca^{2+} , SB e V por dose (Mineral e OMtf).

Dose	Ca^{2+}		SB		V	
	Mineral	OMtf	Mineral	OMtf	Mineral	OMtf
2	4,2225 a	5,5625 a	5,1800 a	6,5975 a	70,50 a	75,25 a
4	5,3925 a	4,8100 a	6,3325 a	5,7800 a	74,25 a	71,00 a
6	4,4925 a	5,2500 a	5,5850 a	6,2450 a	68,75 a	72,50 a
8	4,6175 a	5,1525 a	5,6575 a	6,2125 a	69,50 a	74,00 a

Legenda: Teores de Ca^{2+} trocável e soma de bases (SB) (cmolc dm^{-3}) e saturação por bases (V) (%) em função da dose de fertilizante orgânico (rejeito de frango; 2, 4, 6 e 8 t ha^{-1}), comparando as fontes Mineral e OMtf. OMtf: fertilizante organomineral à base de torta de filtro. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Para as fontes mineral e OMtf, Ca^{2+} , SB e V não se ajustaram aos modelos linear ou quadrático (coeficientes não significativos ou $R^2 < 60\%$). Assim, aplicou-se Tukey sem diferença entre fontes e doses.

O Mg foi afetado pela dose, mas também não apresentou ajuste linear/quadrático (coeficientes não significativos ou $R^2 < 60\%$); pelo Tukey, não houve diferença entre 2, 4, 6 e 8 t ha^{-1} , com 0,7708 a 0,8925 cmolc dm^{-3} .

As demais variáveis (pH em CaCl_2 , K^+ , T, $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e MO) não responderam aos tratamentos; médias gerais: 5,46; 0,1681; 8,2214; 2,2935; 2,1979 (na ordem).

3.1.2 Variáveis biométricas do cafeeiro

O quadro da análise de variância das variáveis biométricas, avaliadas aos 3 e 12 meses após o plantio (MPP), está na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de variância (estatística de Fisher calculada = Fc) das variáveis biométricas aos 3 e 12 MPP.

Tabela 12 - Análise de variância (estatística de Fisher ajustada - F) das variáveis biométricas dos S.C.12.M.1.					
F.V.	g.l.	Altura de planta	Diâm. de caule	Diâm. de copa	Ramos plagiotrópicos
		cm	mm	cm	uni
3 meses após o plantio das mudas de café					
Fertilizante (F)	2	3,980 *	8,109 **	3,836 *	3,016 ^{ns}
Dose (D)	3	0,687 ^{ns}	1,449 ^{ns}	0,342 ^{ns}	0,657 ^{ns}
F*D	6	4,463 **	5,659 **	2,380 ^{ns}	2,866 *
bloco	3	0,223 ^{ns}	0,625 ^{ns}	0,173 ^{ns}	0,256 ^{ns}
erro	33				

Tabela 12 - Continuação

		12 meses após o plantio das mudas de café			
Fertilizante (F)	2	3,893 *	5,708 **	0,361 ^{ns}	9,353 **
Dose (D)	3	1,429 ^{ns}	0,738 ^{ns}	1,040 ^{ns}	0,689 ^{ns}
F*D	6	1,758 ^{ns}	3,829 **	1,152 ^{ns}	2,289 ^{ns}
bloco	3	0,454 ^{ns}	0,292 ^{ns}	0,678 ^{ns}	1,917 ^{ns}
erro	33				

Legenda: F.V.: fonte de variação; g.l: graus de liberdade; F: fertilizante; D: dose; F×D: interação; * e **: efeitos significativos a 5% e 1% de probabilidade, nessa ordem; ns: não significativo; diâm.: diâmetro; ramos plagiotrópicos: número de ramos plagiotrópicos do cafeeiro.

Observa-se interação entre fonte fertilizante e dose para altura de planta, diâmetro de caule e número de ramos plagiotrópicos aos 3 MPP. Aos 12 MPP, esse efeito permaneceu apenas para o diâmetro de caule. O diâmetro de copa, aos 3 MPP, e a altura de planta e o número de ramos plagiotrópicos, aos 12 MPP, responderam apenas à fonte fertilizante. Aos 12 MPP, o diâmetro de copa não variou entre os tratamentos, com média geral de 99,95 cm.

A altura de planta e o número de ramos plagiotrópicos aos 3 MPP, em função das fontes e das doses do fertilizante orgânico, estão na Figura 6.

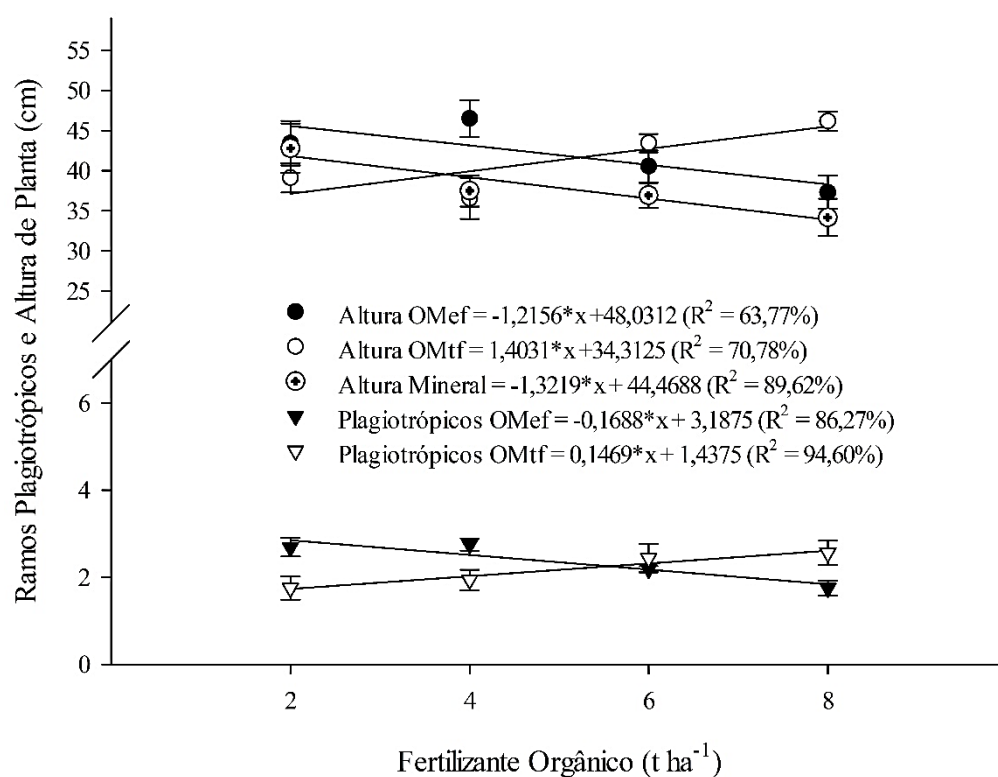


Figura 6 - Altura de planta e ramos plagiotrópicos aos 3 MPP.

Legenda: altura de planta para as fontes mineral, organomineral à base de esterco de frango (OMef) e organomineral à base de torta de filtro (OMtf); ramos plagiotrópicos para OMef e OMtf. As doses referem-se ao fertilizante orgânico de rejeito de frango. Os pontos representam médias, as barras indicam a variação experimental, e as equações de regressão com seus respectivos R^2 constam no gráfico.

A altura de planta ajustou-se aos modelos de regressão nas três fontes, com R^2 igual ou superior a 60%. O acréscimo ocorreu apenas em OMtf, à razão de 1,4031 cm por tonelada

aplicada. Para ramos plagiotrópicos, OMtf apresentou aumento de 0,1469 ramo por tonelada, enquanto OMef mostrou redução ao longo das doses.

O diâmetro de caule aos 3 e 12 MPP está na Figura 7.

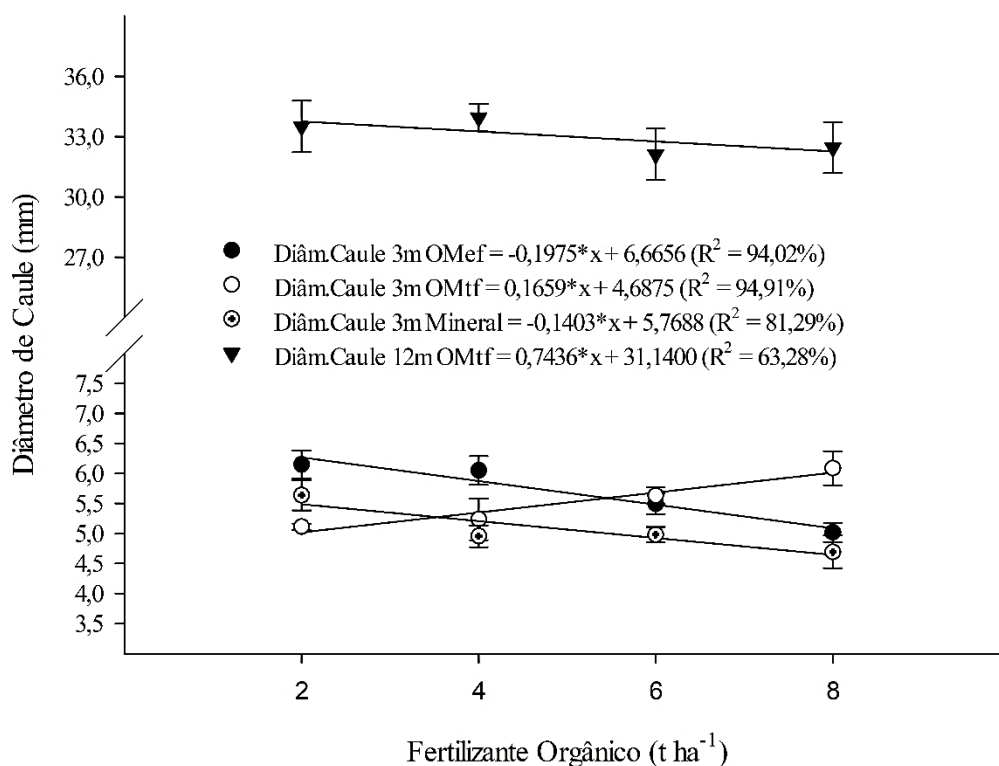


Figura 7 - Diâmetro de caule aos 3 e 12 MPP.

Legenda: na faixa inferior, diâmetro de caule aos 3 MPP para as fontes mineral, OMef e OMtf, em função das doses do fertilizante orgânico de rejeito de frango; na faixa superior, diâmetro de caule aos 12 MPP para OMtf. Os pontos representam médias, as barras indicam a variação experimental, e as equações de regressão com seus respectivos R^2 constam no gráfico.

Aos 3 MPP, o diâmetro de caule ajustou-se aos modelos nas três fontes. Aos 12 MPP, esse ajuste ocorreu apenas em OMtf. Nessa fonte, o diâmetro aumentou 0,1659 mm por tonelada aos 3 MPP e diminuiu 0,7436 mm por tonelada aos 12 MPP.

A comparação do número de ramos plagiotrópicos aos 3 MPP, na fonte mineral, e do diâmetro de caule aos 12 MPP, nas fontes mineral e OMef, está na Tabela 13.

Tabela 13 - Ramos plagiotrópicos aos 3 MPP e diâmetro de caule aos 12 MPP.

Dose ton ha ⁻¹	Ramos plagiotrópicos	Diâmetro de caule	
	uni	mm	
	Mineral	Mineral	OMef
2	2,1875 a	33,5087 a	36,3944 a
4	2,0000 a	33,9475 a	35,0219 a
6	1,8125 a	32,1238 a	35,6894 a
8	1,5625 a	32,4575 a	33,5688 a

Legenda: para ramos plagiotrópicos, a comparação refere-se à fonte mineral entre doses do fertilizante orgânico de rejeito de frango. Para diâmetro de caule, a comparação envolve as fontes mineral e organomineral à base de

esterco de frango (OMef), também entre doses. Médias seguidas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os dados de ramos plagiotrópicos aos 3 MPP, na fonte mineral, e de diâmetro de caule aos 12 MPP, nas fontes mineral e OMef, não apresentaram ajuste adequado aos modelos linear ou quadrático, em razão da não significância dos coeficientes ou de valores de R^2 inferiores a 60%. Por isso, essas variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey, sem diferença entre as doses em cada fonte.

A comparação do diâmetro de copa aos 3 MPP, da altura de planta e do número de ramos plagiotrópicos aos 12 MPP está na Tabela 14.

Tabela 14 - Diâmetro de copa aos 3 MPP, altura de planta e ramos plagiotrópicos aos 12 MPP.

Fertilizantes	Diâmetro de caule	Altura de planta	Ramos plagiotrópicos
	mm	cm	uni
Mineral	25,3750 b	125,3438 b	21,3906 b
OMef	26,8906 a	135,0625 a	22,7812 a
OMtf	26,6093 ab	131,7500 a	23,3125 a

Legenda: diâmetro de copa expresso em cm; altura de planta, em cm; ramos plagiotrópicos, em unidade por planta. Mineral: fonte mineral; OMef: organomineral à base de esterco de frango; OMtf : organomineral à base de torta de filtro. Médias seguidas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nessas variáveis, a resposta decorreu apenas da fonte fertilizante. OMef e OMtf promoveram maior altura de planta e maior número de ramos plagiotrópicos que a fonte mineral. Para diâmetro de copa, OMef superou a fonte mineral, enquanto OMtf ocupou posição intermediária, sem diferir das demais.

3.1.3 Variáveis bioquímicas do cafeeiro

A análise de variância das variáveis bioquímicas do cafeeiro, avaliadas aos 31 meses após o plantio (MPP), está apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise de variância (estatística de Fisher calculada = Fc) de variáveis bioquímicas 31 MPP.

F.V.	g.l.	PST	POD	PL	CAT	SOD	H ₂ O ₂
Fertilizante (F)	2	2.960 ^{ns}	0.338 ^{ns}	142.516 **	86.660 **	23.922 **	28.570 **
Dose (D)	3	1.758 ^{ns}	1.123 ^{ns}	11.658 **	41.688 **	12.569 **	9.155 **
F*D	6	0.291 ^{ns}	4.793 **	24.138 **	58.375 **	2.648 *	19.971 **
bloco	3	0.239 ^{ns}	1.105 ^{ns}	0.968 ^{ns}	0.259 ^{ns}	0.688 ^{ns}	2.073 ^{ns}
erro	33						

Legenda: F.V.: fonte de variação. g.l.: graus de liberdade. F: fertilizante. D: dose. F×D: interação. * e **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, nessa ordem. ns: não significativo. PST: proteínas solúveis totais. POD: peroxidase. PL: peroxidação lipídica. CAT: catalase. SOD: superóxido dismutase. H₂O₂: peróxido de hidrogênio.

Observa-se interação entre fonte fertilizante e dose para peroxidase, peroxidação lipídica, catalase, superóxido dismutase e peróxido de hidrogênio. Para proteínas solúveis totais, não houve efeito de fertilizante, dose ou interação, com média geral de $4,38 \mu\text{g mL}^{-1}$.

As respostas de peroxidase e peróxido de hidrogênio, bem como de superóxido dismutase e catalase, sob a fonte mineral combinada com doses do fertilizante orgânico, estão apresentadas na Figura 8.

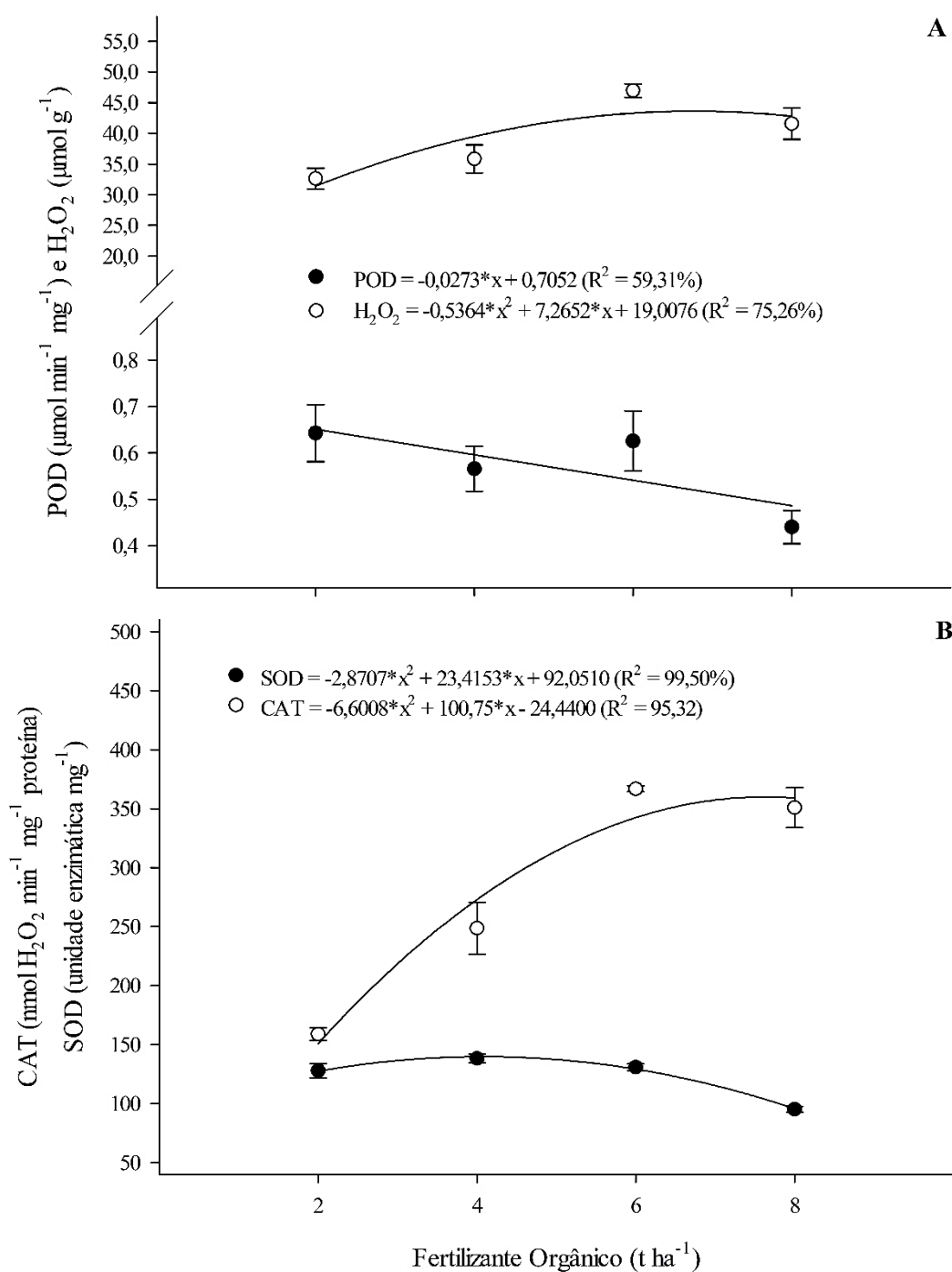


Figura 8 - Peroxidase, peróxido de hidrogênio, superóxido dismutase e catalase sob a fonte mineral.

Legenda: em A, atividade de peroxidase (POD) e teor de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Em B, atividade de superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT). As doses referem-se ao fertilizante orgânico de rejeito de frango. As equações de regressão e os valores de R^2 constam no gráfico. As unidades estão indicadas nos eixos.

Na fonte mineral, a atividade de peroxidase diminuiu $0,0273 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ de proteína por tonelada aplicada. O teor de peróxido de hidrogênio aumentou até $6,77 \text{ t ha}^{-1}$. A atividade de superóxido dismutase cresceu até $4,06 \text{ t ha}^{-1}$, e a de catalase, até $7,63 \text{ t ha}^{-1}$.

Os efeitos da fonte organomineral à base de esterco de frango sobre catalase e peroxidação lipídica, em função das doses do fertilizante orgânico, estão na Figura 9.

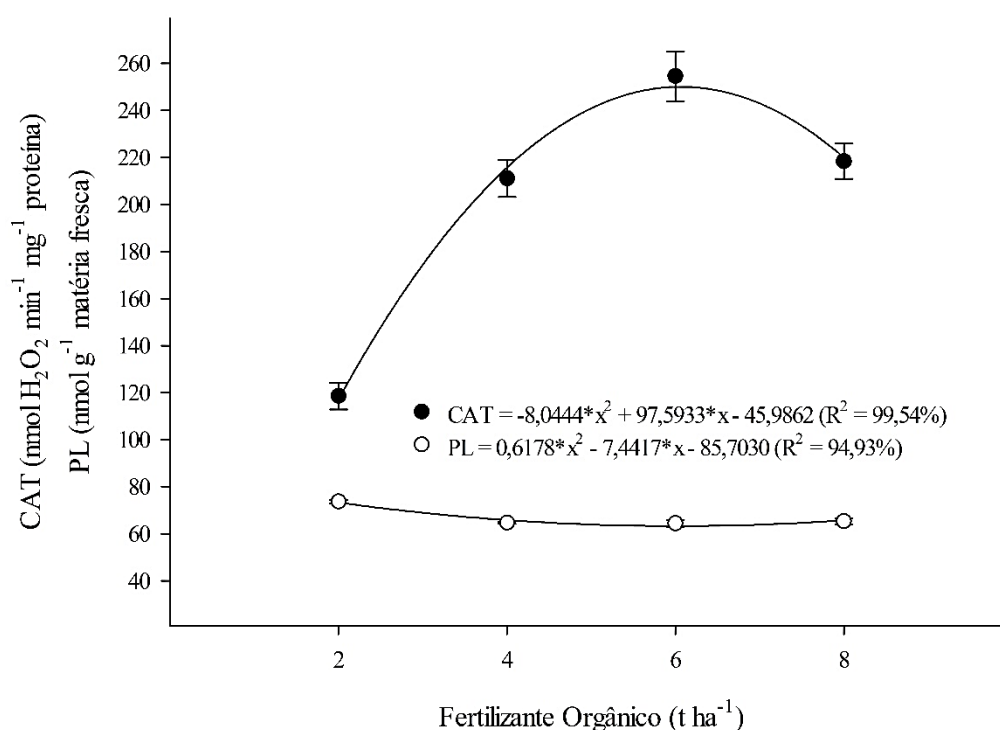


Figura 9 - Catalase e peroxidação lipídica sob OMef.

Legenda: CAT: catalase. PL: peroxidação lipídica. OMef: fertilizante organomineral à base de esterco de frango. As doses referem-se ao fertilizante orgânico de rejeito de frango. As equações de regressão e os valores de R^2 constam no gráfico. As unidades estão indicadas nos eixos.

Na fonte OMef, a atividade de catalase aumentou até $6,07 \text{ t ha}^{-1}$. Para peroxidação lipídica, o acréscimo ocorreu a partir de $6,02 \text{ t ha}^{-1}$.

Os indicadores oxidativos da fonte organomineral à base de torta de filtro, em função das doses do fertilizante orgânico, estão apresentados na Figura 10.

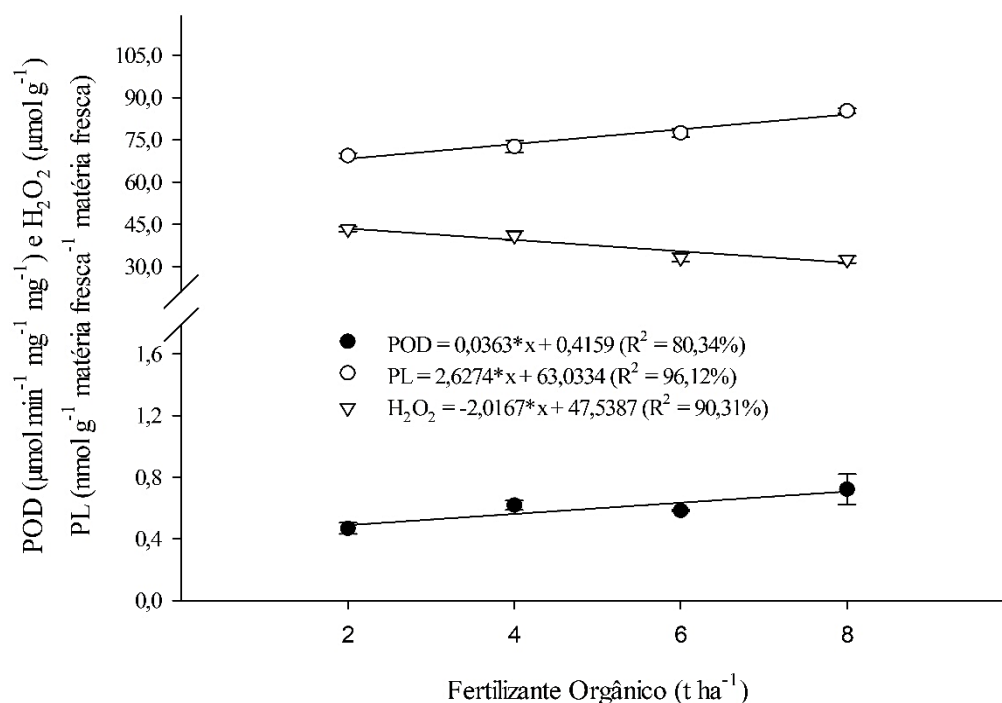


Figura 10 - Peroxidase, peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio sob OMtf.

Legenda: POD: peroxidase. PL: peroxidação lipídica. H_2O_2 : peróxido de hidrogênio. OMtf: fertilizante organomineral à base de torta de filtro. As doses referem-se ao fertilizante orgânico de rejeito de frango. As equações de regressão e os valores de R^2 constam no gráfico. As unidades estão indicadas nos eixos.

Na fonte OMtf, a atividade de peroxidase aumentou $0,0363 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ de proteína por tonelada aplicada. A peroxidação lipídica também cresceu com a dose, enquanto o teor de peróxido de hidrogênio diminuiu ao longo do intervalo avaliado.

As respostas bioquímicas associadas ao estresse oxidativo do cafeeiro, em função das fontes e das doses do fertilizante orgânico, estão reunidas na Tabela 16.

Tabela 16 - Respostas bioquímicas por fonte e dose.

Fertilizante orgânico	POD	SOD	H_2O_2	SOD	CAT	PL
ton ha^{-1}		OMef		OMtf		Mineral
2	0,6545 a	146,99 ab	42,3665 ab	160,63 a	410,85 a	80,3690 c
4	0,5630 a	142,01 ab	61,8055 a	141,69 ab	208,58 d	99,7802 a
6	0,6505 a	158,68 a	38,1503 c	158,47 ab	313,47 c	78,0276 c
8	0,4747 a	135,03 b	45,6860 b	136,56 b	263,85 b	89,1056 b

Legenda: OMef: fertilizante organomineral à base de esterco de frango. OMtf: fertilizante organomineral à base de torta de filtro. POD: peroxidase, em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ de proteína. SOD: superóxido dismutase, em unidade enzimática mg^{-1} de proteína. CAT: catalase, em $\text{nmol } H_2O_2 \text{ min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ de proteína. H_2O_2 : peróxido de hidrogênio, conforme unidade indicada na tabela. PL: peroxidação lipídica, em nmol g^{-1} de matéria fresca. Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Tabela 10 reúne as respostas bioquímicas associadas ao estresse oxidativo do cafeeiro em função das fontes fertilizantes e das doses do fertilizante orgânico. Em conjunto com as Figuras 6, 7 e 8, esses dados mostram que o comportamento do sistema antioxidante e dos indicadores oxidativos depende da fonte utilizada e do nível de fertilizante orgânico aplicado.

3.1.4 Variável de produtividade

O efeito da dose do fertilizante orgânico sobre a produtividade de grãos de café está apresentado na Figura 11.

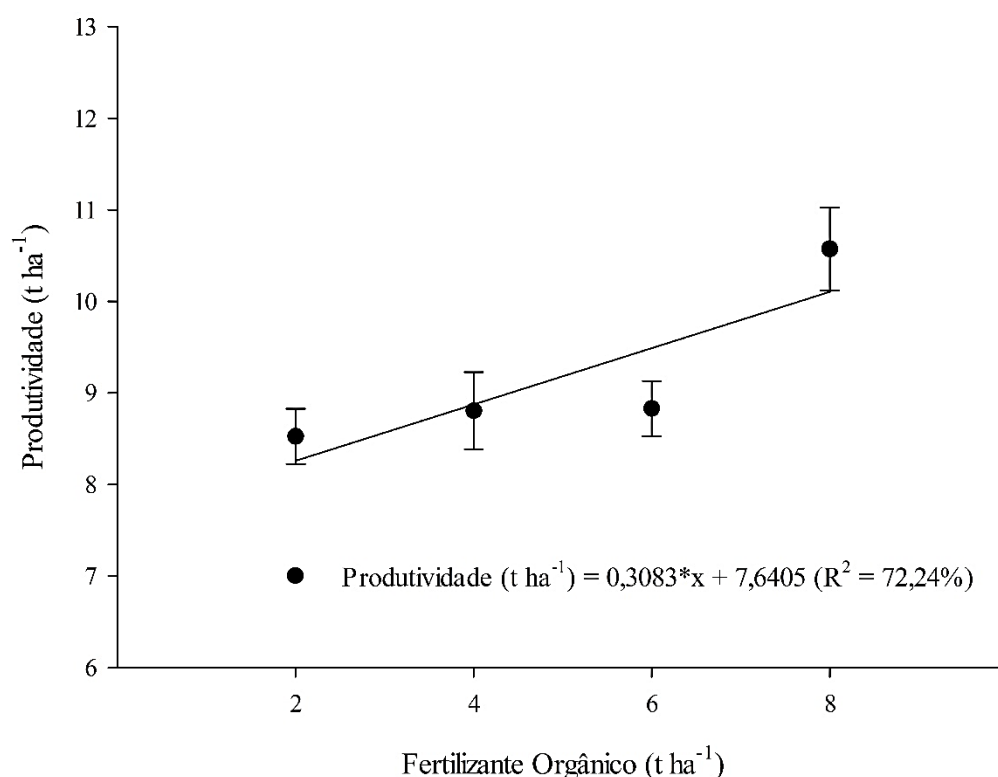


Figura 11 - Produtividade de grãos de café em função da dose do fertilizante orgânico.

Legenda: o fertilizante orgânico corresponde ao rejeito de frango. Os pontos representam as médias observadas, a linha representa o ajuste de regressão e as barras indicam a variação experimental. A equação do modelo e o valor de R^2 constam no gráfico.

A análise de variância indicou efeito significativo apenas da dose do fertilizante orgânico sobre a produtividade de grãos de café, com $F_c = 3,516$ e $p \leq 0,05$. O ajuste mostrou acréscimo de $308,3 \text{ kg ha}^{-1}$ para cada tonelada aplicada.

Não houve efeito significativo de blocos para as variáveis avaliadas, o que indica ausência de diferença sistemática entre blocos e reforça a consistência dos dados apresentados nas Tabelas 10, 12, 15.

4 DISCUSSÃO

4.1 Variáveis de solo

A avaliação aos 3 meses após o plantio mostra que a combinação entre fonte fertilizante e dose do fertilizante orgânico altera cedo a química da camada de 0-20 cm, com resposta mais nítida para P e, em menor grau, para atributos ligados às bases trocáveis. Em solos tropicais muito intemperizados, esse padrão decorre da liberação em ritmo menos concentrado e da menor adsorção do nutriente, pela disputa por sítios de retenção e pela ação de compostos orgânicos que favorecem a desadsorção do P (Sá *et al.*, 2017; Soltangheisi *et al.*, 2019; Mumbach *et al.*, 2020; Frazão *et al.*, 2021; Benites *et al.*, 2022).

A resposta mais forte do fósforo com o organomineral à base de esterco de frango (OMef) indica que essa matriz fornece fração mais lábil e cria um microambiente que amplia a mobilidade do nutriente, por estímulo microbiano e por complexação transitória. Do ponto de vista agrônomo, isso favorece o estabelecimento do cafeeiro, fase em que o sistema radicular ainda está em expansão e a limitação de P reduz o avanço inicial da planta (Soltangheisi *et al.*, 2019; Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022).

No organomineral à base de torta de filtro (OMtf), a ausência de separação entre doses é compatível com ensaios de curto prazo. Nessa fonte, a mineralização do resíduo ocorre em ritmo menor e a alta capacidade de fixação do solo reduz o contraste entre níveis próximos de aplicação. Por isso, a resposta aos 3 meses foi discreta, sem indicar menor valor agrônomo da fonte, mas maior tempo de interação solo-resíduo para que o efeito apareça com clareza (Soltangheisi *et al.*, 2019; Mota *et al.*, 2023).

Para Ca, soma de bases e saturação por bases, a falta de ajuste consistente e a ausência de diferença em parte dos tratamentos indicam resposta por acúmulo, o que exige janela temporal maior. O sinal observado em OMef sugere que a matriz orgânica antecipa ganhos em bases trocáveis e melhora o ambiente químico da rizosfera. Em materiais ricos em Ca e matéria orgânica, esse efeito tem sido associado ao aumento gradual da saturação por bases e à redução de restrições ligadas à acidez sem aumento de Al em forma tóxica na camada superficial (Soltangheisi *et al.*, 2019; Benites *et al.*, 2022; Sánchez-Reinoso *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

O Mg respondeu à dose do fertilizante orgânico, mas sem padrão de regressão estável. Esse comportamento é comum em avaliações curtas, nas quais a dinâmica do Mg depende da forma química presente no resíduo, da competição entre cátions no complexo de troca e do

fluxo de água no solo. O resultado sugere aporte real, mas ainda exige novas avaliações para definir o efeito residual com segurança (Mumbach *et al.*, 2020).

No conjunto, a matriz orgânica do organomineral define a velocidade e o tipo de resposta do solo no início do ciclo. O OMEf intensifica a disponibilidade inicial de P e antecipa ganhos em atributos de bases. O OMtf requer maior tempo para expressar diferença entre doses. Os achados deste estudo reforçam o uso de organominerais como estratégia para elevar a eficiência no fornecimento de nutrientes e na reciclagem de resíduos. Também indicam a necessidade de acompanhar o efeito residual em novas datas de avaliação. Recomenda-se fracionar as aplicações de P, manter séries temporais entre 6 e 24 meses e associar essas leituras ao diagnóstico nutricional da planta, para ligar as mudanças químicas iniciais ao desempenho do cafeeiro no médio e no longo prazo (Soltangheisi *et al.*, 2019; Mumbach *et al.*, 2020; Benites *et al.*, 2022).

4.2 Variáveis biométricas

Aos 3 MPP, a interação entre fonte fertilizante e dose para altura, diâmetro do caule e número de ramos plagiotrópicos mostra que o crescimento inicial do cafeeiro depende do ritmo de liberação dos nutrientes e da natureza da matriz orgânica. Em organominerais, essa resposta decorre da combinação entre fração mineral, que atende a demanda imediata, e fração orgânica, que altera o ambiente radicular e prolonga a oferta no solo (Benites *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023).

No organomineral à base de esterco de frango (OMef), o ganho em altura indica suprimento mais eficiente no início do ciclo. A cama de frango reúne frações de decomposição mais rápida, o que amplia a oferta de nutrientes no entorno das raízes e favorece a expansão da parte aérea. No estabelecimento do cafeeiro, esse efeito tem valor agrônomo porque reduz a limitação inicial ao crescimento e acelera a formação da planta (Benites *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023).

Já o organomineral à base de torta de filtro (OMtf) destacou-se pelo aumento do número de ramos plagiotrópicos e do diâmetro do caule. Esse padrão indica estímulo à arquitetura da planta e à biomassa de sustentação, dois atributos ligados à formação de sítios produtivos e à capacidade de suporte da copa. Em ensaios com torta de filtro, esse comportamento foi relacionado ao aporte de C orgânico e nutrientes e à melhora do ambiente físico do solo, com maior retenção de água e melhor condição para o crescimento radicular (Soares *et al.*, 2024).

A ausência de ajuste em parte dos conjuntos, como ramos plagiotrópicos sob a fonte mineral aos 3 MPP e diâmetro do caule sob fonte mineral e OMef aos 12 MPP, indica que nem todo efeito responde de forma linear à dose. Em solo já corrigido e com disponibilidade inicial razoável, o ganho marginal tende a cair, e parte do efeito do organomineral pode surgir após maior tempo de decomposição da matriz (Benites *et al.*, 2022).

A falta de diferença para o diâmetro de copa aos 12 MPP indica que a expansão lateral da planta, nessa etapa, esteve mais ligada ao ritmo fenológico e ao manejo geral do que à fonte aplicada. Ainda assim, os ganhos em altura, espessura do caule e ramificação observados com os organominerais apontam maior vigor inicial, condição ligada à formação de plantas mais equilibradas para safras futuras (Mota *et al.*, 2023; Soares *et al.*, 2024).

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem o uso de organominerais como alternativa ou complemento à adubação mineral quando o objetivo é unir estabelecimento vigoroso e manutenção da qualidade do solo. A escolha entre esterco de frango e torta de filtro não deve considerar só o teor de nutrientes, mas também o ritmo de liberação e o atributo que se busca favorecer na formação da planta. O OMef mostrou maior efeito sobre altura no início do ciclo, enquanto o OMtf contribuiu mais para espessura do caule e emissão de ramos (Benites *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023; Soares *et al.*, 2024).

4.3 Variáveis bioquímicas

As proteínas solúveis totais (PST) não responderam aos tratamentos, o que indica a manutenção do teor global de proteínas foliares. Já a peroxidase (POD) e a catalase (CAT) variaram com fonte e dose. O mesmo ocorreu com a superóxido dismutase (SOD), a peroxidação lipídica (PL) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), o que confirma ajuste do sistema antioxidante e do nível de dano oxidativo.

Na fonte mineral, a queda de POD, acompanhada pelo aumento de SOD e CAT até faixas intermediárias e alta, indica mudança na rota de controle das espécies reativas de oxigênio. A SOD converte radical superóxido em H_2O_2 , e a CAT passa a remover parte maior desse oxidante. O aumento de H_2O_2 até a faixa superior de dose mostra que a geração de oxidantes superou a remoção total, mesmo com reforço enzimático. Esse padrão é compatível com o efeito do suprimento de N sobre o aparato antioxidante do cafeeiro, no qual a nutrição redefine a intensidade e a direção da resposta enzimática (Reis *et al.*, 2015).

No organomineral à base de esterco de frango (OMef), o aumento de CAT até cerca de 6 t ha^{-1} indica reforço na decomposição do H_2O_2 . Acima desse ponto, o aumento de PL mostra

que o sistema já operou sob custo fisiológico maior, com dano de membrana. Isso sugere uma faixa de dose em que o aporte de nutrientes e de C lábil favorece a proteção celular, seguida por outra em que o ganho metabólico deixa de compensar a pressão oxidativa. Para o manejo, esse resultado indica que a resposta bioquímica do OMef é favorável até um limite, acima do qual a estabilidade foliar cai.

No organomineral à base de torta de filtro (OMtf), o aumento de POD e PL, associado à queda de H_2O_2 , indica rota distinta de ajuste redox. Parte do peróxido foi consumida nas reações catalisadas pela peroxidase, mas o sistema ainda acumulou dano em membrana. Assim, a redução de H_2O_2 não indica, por si só, menor estresse. Ela indica mudança na via dominante de resposta. Nesse caso, a torta de filtro modulou o metabolismo oxidativo com maior participação da POD e menor preservação da integridade das membranas (Mota *et al.*, 2023; Uddin *et al.*, 2025).

Do ponto de vista agrônômico, os dados mostram que a dose do fertilizante orgânico deve ser definida não só pelo suprimento de nutrientes, mas também pelo efeito sobre o estado redox da planta. Faixas intermediárias favoreceram ajuste antioxidante mais eficiente. Doses acima desse intervalo elevaram marcadores de dano, o que reduz a previsibilidade do benefício fisiológico. Assim, o uso de organominerais exige calibração conjunta entre nutrição e resposta metabólica, para que o ganho em disponibilidade de nutrientes não seja acompanhado por maior injúria oxidativa (Reis *et al.*, 2015; Mota *et al.*, 2023; Uddin *et al.*, 2025).

4.4 Produtividade do café

O aumento linear do rendimento com a dose do fertilizante orgânico indica que, na área estudada, o suprimento de nutrientes ainda limitava a produção no primeiro ciclo. O acréscimo de 308,3 kg ha⁻¹ por tonelada aplicada mostra que o composto ampliou a oferta efetiva de nutrientes, com reflexo na formação e no enchimento dos frutos. Esse padrão concorda com estudos em cafeeiro que associam fontes orgânicas e organominerais ao maior aproveitamento dos nutrientes e ao aumento da colheita (Fernandes *et al.*, 2020; Chaudhary *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023).

Esse ganho não decorre de um único fator. No presente estudo, o aumento de P, Ca²⁺, soma de bases e saturação por bases, somado ao maior vigor inicial das plantas, criou condição mais favorável ao crescimento e à definição da produção. O ajuste do sistema

antioxidante em parte das combinações também indica um ambiente fisiológico mais equilibrado, o que ajuda a explicar o avanço do rendimento ao longo do ciclo.

Do ponto de vista agrônomo, o efeito mostra que o fertilizante orgânico formulado com rejeito de frango elevou a produção dentro da faixa de 2 a 8 t ha⁻¹. Isso não indica resposta ilimitada acima desse intervalo. Em doses superiores, é esperado um ponto de máxima eficiência, seguido por menor retorno agrônomo e maior risco de desbalanço nutricional. Por isso, a recomendação deve considerar o estado inicial do solo, a qualidade do insumo e a meta produtiva da lavoura. Em geral, os ganhos são mais fortes em solos com menor teor de matéria orgânica e menor disponibilidade de P (Fernandes *et al.*, 2020; Mota *et al.*, 2023).

Os dados deste estudo apoiam o uso de fontes orgânicas e organominerais como parte da estratégia nutricional do cafeeiro, não só pelo aumento da produção, mas também pela reciclagem de resíduos e pela menor dependência de fertilizantes minerais importados. Para consolidar essa recomendação, novas safras devem ser acompanhadas com análise econômica, avaliação da disponibilidade hídrica e quantificação da mineralização dos nutrientes, de modo a definir a faixa de dose com maior retorno agrônomo e operacional (Chaudhary *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023; Uddin *et al.*, 2025).

5 CONCLUSÕES

Os fertilizantes organominerais promoveram respostas distintas no cafeeiro. O organomineral à base de esterco de frango elevou a disponibilidade de P e melhorou atributos ligados às bases trocáveis, com maior efeito no início do ciclo. O organomineral à base de torta de filtro favoreceu o diâmetro do caule e a emissão de ramos plagiotrópicos. A produtividade aumentou com a dose do fertilizante orgânico, com acréscimo estimado de 308,3 kg ha⁻¹ de grãos por tonelada aplicada.

As respostas bioquímicas indicaram que doses entre 4 e 6 t ha⁻¹ favoreceram o sistema antioxidante, com aumento de superóxido dismutase e catalase, sem elevação expressiva da peroxidação lipídica. Assim, organominerais associados a doses ajustadas do composto orgânico ampliam a disponibilidade de nutrientes, reforçam o vigor inicial e melhoram o ajuste redox da planta.

Conclui-se que essas fontes constituem alternativa agronomicamente viável à adubação mineral convencional no cafeeiro, desde que haja controle de qualidade dos resíduos, monitoramento do solo e das folhas e ajuste da dose ao nível inicial de fertilidade.

REFERÊNCIAS

- AFRIZAL, A. et al. Improving the quality of media and Robusta coffee seedlings with mycorrhizal (AMF) and rock phosphate. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1183, 012028, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1183/1/012028>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, p. 1337-1344, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC International**. 18. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2007. Método 993.13.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, Â. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983.
- BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. **Analytical Biochemistry**, v. 44, p. 276-287, 1971. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8). Acesso em: 15 jan. 2026.
- BENITES, V. M.; DAL MOLIN, S. J.; MENEZES, J. F. S.; GUIMARÃES, G. S.; MACHADO, P. L. O. de A. Organomineral fertilizer is an agronomic efficient alternative for poultry litter phosphorus recycling in an acidic Ferralsol. **Frontiers in Agronomy**, v. 4, 785753, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.785753>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- BOR, M.; ÖZDEMİR, F.; TÜRKAN, İ. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. **Plant Science**, v. 164, p. 77-84, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00338-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00338-2). Acesso em: 15 jan. 2026.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248-254, 1976. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3). Acesso em: 15 jan. 2026.
- BRAVIN, N. P. et al. Crescimento inicial do cafeeiro robusta submetido a consórcios culturais nas entrelinhas. **Agrarian**, Dourados, v. 13, p. 169-177, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i48.8337>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CHAMBERS, J. M.; CLEVELAND, W. S.; KLEINER, B.; TUKEY, P. A. **Graphical methods for data analysis**. Belmont, CA: Wadsworth and Brooks/Cole, 1983.
- CHAUDHARY, J. N. et al. Effects of organic manures on yield and yield attributes of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes. **Journal of Agriculture and Natural Resources**, v. 5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3126/janr.v5i1.50722>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005.

DA MATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, p. 485-510, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>. Acesso em: 15 jan. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

Disponível em:

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/169149/1/Manual-de-metodos-de-analise-de-solo-2-ed-1997.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 15 jan. 2026.

FERNANDES, A. L. T. et al. Use of organic fertilization with irrigation in coffee production in Brazilian Cerrado. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, e2578, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2578>. Acesso em: 15 jan. 2026.

FRAZÃO, J. J. et al. A poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer has higher agronomic effectiveness than conventional phosphate fertilizer applied to field-grown maize and soybean. **Sustainability**, v. 13, 11635, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111635>. Acesso em: 15 jan. 2026.

FREITAS, A. S. et al. Enzymes activity as potential molecular markers for drying tolerance and quality in *Coffea arabica* seeds. **Coffee Science**, v. 19, e192229, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.25186/v19i.2229>. Acesso em: 15 jan. 2026.

FREITAS, T. et al. Technologies for fertilizers and management strategies of N-fertilization in coffee cropping systems to reduce ammonia losses by volatilization. **Plants**, v. 11, 3323, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11233323>. Acesso em: 15 jan. 2026.

GUPTA, R. et al. Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. **Plant Cell Reports**, v. 43, 213, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6>. Acesso em: 15 jan. 2026.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, p. 189-198, 1968. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1). Acesso em: 15 jan. 2026.

LIU, H. et al. Hydrogen peroxide signaling in the maintenance of plant root apical meristem activity. **Antioxidants**, v. 13, 554, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antiox13050554>. Acesso em: 15 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília, DF: MAPA, 2017. 240 p. ISBN 978-85-7991-109-5. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf. Acesso em: 15 jan. 2026.

- MARTÍNEZ-DALMAU, J. et al. Nitrogen fertilization: a review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses. **Sustainability**, v. 13, 5625, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13105625>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- MOTA, R. P. et al. Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): fertilizer levels and application times. **Coffee Science**, v. 18, p. 1-10, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.25186/v18i.2098>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- MUMBACH, G. L. et al. Agronomic efficiency of organomineral fertilizer in sequential grain crops in southern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 3037-3049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20238>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- PEIXOTO, P. H. P.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIM, P. R.; MOREIRA, M. A. Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, DF, v. 11, n. 3, p. 137-143, 1999.
- PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002.
- REIS, A. R. et al. Antioxidant metabolism in coffee (*Coffea arabica* L.) plants in response to nitrogen supply. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, p. 203-213, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40626-015-0045-3>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- SÁ, J. M. et al. Agronomic and P recovery efficiency of organomineral phosphate fertilizer from poultry litter in sandy and clayey soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 794-805, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2017.v52.24713>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- SÁNCHEZ-REINOSO, A. D. The application of coffee pulp biochar improves the physical, chemical, and biological characteristics of soil for coffee cultivation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p. 2512-2524, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01208-4>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- SOARES, A. A. V. L. et al. Contribution of using filter cake and vinasse as a source of nutrients for sustainable agriculture: a review. **Sustainability**, v. 16, 5411, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16135411>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- SOLTANGHEISI, A. et al. Phosphate sources and filter cake amendment affecting sugarcane yield and soil phosphorus fractions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180227, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180227>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- TEISSEIRE, H.; GUY, V. Copper-induced changes in antioxidant enzymes activities in fronds of duckweed (*Lemna minor*). **Plant Science**, v. 153, p. 65-72, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00257-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00257-5). Acesso em: 15 jan. 2026.
- TEIXEIRA, M. D.; DELÚ FILHO, N. Aplicação do fertilizante organomineral na produtividade do cafeeiro. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, v. 6, n. 3, p. 135-153, 2024. Disponível em: <https://periodicos.unis.edu.br/agrovetsulminas/article/view/957>. Acesso em: 15 jan. 2026.

UDDIN, M. K.; SAHA, B. K.; WONG, V. N. L.; PATTI, A. F. Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: a comprehensive review. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 127433, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127433>. Acesso em: 15 jan. 2026.

VEIGA, A. D. et al. **Desempenho agrônômico de cultivares de café Conilon com diferentes épocas de maturação dos frutos no Cerrado Central**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2020. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 367). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1130784>. Acesso em: 15 jan. 2026.

WANG, K. R. et al. Alleviation of organic manure on aluminum toxicity in acid red soil. **Journal of Plant Nutrition and Fertilizers**, v. 13, p. 637-641, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.11674/zwfyf.2007.0416>. Acesso em: 15 jan. 2026.

WITHERS, P. J. A. et al. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. **Environmental Science & Technology**, v. 48, p. 6523-6530, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es501670j>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ZAIB, M. et al. A review on challenges and opportunities of fertilizer use efficiency and their role in sustainable agriculture with future prospects and recommendations. **Current Research in Agriculture and Farm**, v. 4, p. 1-14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18782/2582-7146.201>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ZHANG, S. Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: a world-wide meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 345, 118531, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ZHANG, Y. F. et al. Hydrogen peroxide regulated salicylic acid- and jasmonic acid-dependent systemic defenses in tomato seedlings. **Food Science and Technology**, v. 42, e54920, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/fst.54920>. Acesso em: 15 jan. 2026.