

**INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL
E SUBTROPICAL**

**IMPACTOS DE DIFERENTES PREPAROS NA
IMPLANTAÇÃO DO CANAVIAL EM LATOSSOLO
VERMELHO DISTRÓFICO: QUALIDADE DO SOLO E
PRODUTIVIDADE DE COLMOS**

ELEN SATURNINO FERREIRA

CAMPINAS, SP
MARÇO/2026

**INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL
E SUBTROPICAL**

**IMPACTOS DE DIFERENTES PREPAROS NA
IMPLANTAÇÃO DO CANAVIAL EM LATOSSOLO
VERMELHO DISTRÓFICO: QUALIDADE DO SOLO E
PRODUTIVIDADE DE COLMOS**

ELEN SATURNINO FERREIRA

Orientadora: Isabella Clerici De Maria

Coorientador: Wellington da Silva Guimarães Júnnyor

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical Área de concentração em Sistema de Manejo e Qualidade Ambiental.

CAMPINAS, SP
MARÇO 2026

Ficha elaborada pela bibliotecária do Seção de Documentação Científica do Instituto Agrônômico

F383i Ferreira, Elen Saturnino
Impactos de diferentes preparos na implantação do canavial em latossolo vermelho distrófico: qualidade do solo e produtividade de Colmos /Elen Saturnino Ferreira. Campinas, 2026. 141 fls

Orientadora: Isabella Clerici De Maria
Co-orientador: Wellington da Silva Guimarães Júnnyor
Dissertação (Mestrado) Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agrônômico

1. Compactação do Solo. 2. Plantio Direto, 3. *Saccharum officinarum*.
I. De Maria, Isabella Clerici. I. Guimarães Júnnyor, Wellington da Silva
III Título

CDD.631.43



GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE AGRICULTURA E
ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO AGRONÔMICO



Pós-Graduação – Agricultura Tropical e Subtropical
Reconhecimento Homologado pela Portaria MEC Nº 609 de 14/03/2019 - D.O.U. 18/03/2019

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos 26 de março de 2026, às 09h00, reuniu-se a banca examinadora homologada pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, composta pelos membros abaixo listados visando à defesa de dissertação de mestrado de Elen Saturnino Ferreira, para obtenção do título de "**MESTRE**", conforme Processo SAA nº PRT4285/2024. A sessão presidida pela Prof^ª. Dr^ª. Isabella Clerici De Maria, orientadora da aluna, foi realizada em sessão pública aberta. Iniciados os trabalhos, a candidata submeteu-se ao exame de sua dissertação, intitulada "IMPACTOS DE DIFERENTES PREPAROS NA IMPLANTAÇÃO DO CANAVIAL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO: QUALIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE COLMOS". Terminado o exame, procedeu-se ao julgamento, cujo resultado foi o seguinte:

Prof ^ª . Dr ^ª . Isabella Clerici De Maria - IAC	APROVADA (X)	REPROVADA ()
Prof ^ª . Dr ^ª . Adriana Parada Dias da Silveira - IAC	APROVADA (X)	REPROVADA ()
Prof. Dr. Denizart Bolonhezi - IAC/APTA	APROVADA (X)	REPROVADA ()

Apurados os resultados, constatou-se que a candidata foi habilitada, fazendo jus, portanto, ao título de "**MESTRE EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL**", na área de concentração: Sistema de Manejo e Qualidade Ambiental, do que, para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pelos membros da comissão examinadora:


Prof^ª. Dr^ª. Isabella Clerici De Maria - IAC


Prof^ª. Dr^ª. Adriana Parada Dias da Silveira - IAC


Prof. Dr. Denizart Bolonhezi - IAC/APTA

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus, por todas as oportunidades concedidas e, especialmente, pela força e capacidade de concluir o mestrado. Por ter sido meu sustento nos momentos de fraqueza e minha fortaleza nos dias mais difíceis.

Dedico à minha família, meu alicerce. Em especial, à minha mãe, Cidimara, por todo apoio durante meus estudos, por estar presente em todos os momentos, transmitindo a estabilidade necessária, incentivando-me a buscar sempre o meu melhor, como estudante e como pessoa.

Ao meu pai, que hoje cuida de mim aí de cima. Todos os dias me lembro do senhor, da sua luta diária, da sua determinação e da sua força. Essa garra quero levar comigo por onde eu estiver. Sua memória é combustível para que eu continue vencendo.

Aos meus irmãos, Eduarda e João, companheiros de vida, e à pequena Helena, que chegou para colorir meu mundo com seu sorriso puro e, nos pequenos gestos, demonstra a presença de Deus em nossa vida. Com você, nossa pequena bebê, a vontade de vencer só aumentou.

E, por fim, a todos que acreditaram em mim.

“ O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia ”

Robert Collier

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora, por todas as bênçãos e pela saúde concedida, que me permitiram seguir firme no caminho da realização dos meus objetivos e sonhos.

À minha família, minha base e meu alicerce. Aos meus pais, Cidimara e Carlos, e ao meu padrasto, Jusení, assim como aos meus irmãos, Eduarda e João, pelo apoio incondicional. O tão sonhado título que hoje conquisto é fruto do incentivo de vocês, minha eterna gratidão.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Isabella Clerici De Maria, pela orientação conduzida com dedicação, serenidade, competência e, sobretudo, paciência. É uma honra ter sido sua orientada, e sinto imenso orgulho por ter recebido seus ensinamentos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor, pelo apoio ao longo desta etapa, esclarecendo dúvidas e contribuindo nas correções. Sua postura crítica e suas reflexões técnicas ampliaram minha visão científica e contribuíram para minha formação.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação, pelos conhecimentos transmitidos e pela contribuição à minha formação acadêmica. Aos funcionários da instituição, pela atenção e qualidade no atendimento aos alunos.

Ao Phillpe Marques de Rezende e à Ana Carolina Vidal do Nascimento, pela convivência e amizade construídas durante o período de desenvolvimento deste trabalho, especialmente nas incansáveis noites na cozinha do alojamento. Os momentos de diálogo e troca de experiências, ainda que muitas vezes não diretamente relacionados às pesquisas, contribuíram para tornar essa etapa mais leve e fortalecedora.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos. “O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

À AGRISUS pelo apoio financeiro ao Projeto AGRISUS N° 4110/25

Meu agradecimento especial aos membros da banca examinadora, Dr.^a Adriana Parada Dias da Silveira e Dr. Denizart Bolonhezi, por aceitarem o convite e pelas contribuições.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.2 Hipóteses.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo Geral.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Cana-de-açúcar e os efeitos do cultivo sobre o solo.....	4
2.2 Operações de preparos do solo aplicado à produção da cana-de-açúcar.....	5
2.3 Qualidade e saúde do solo	9
2.4 Atributos indicadores da qualidade do solo	11
2.5.1 Atributos físicos	13
2.4.2 Atributos químicos	20
2.4.3 Atributos microbiológicos	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Localização e caracterização da área experimental	36
3.2 Delineamento experimental	39
3.3 Condução experimental e manejo da cultura	39
3.4 Avaliação dos parâmetros de qualidade do solo	41
3.4.1 Atributos Físicos	42
3.4.1.1 Granulometria	42
3.4.1.2 Argila dispersa em água e Índice de floculação	43
3.4.1.3 Densidade do Solo e Porosidade do solo	43
3.4.1.4 Retenção de água no solo	43
3.4.1.5 Condutividade hidráulica	44
3.4.1.6 Estabilidade de Agregado	45
3.4.1.7 Resistência do solo à penetração em laboratório	45
3.4.2 Atributos Químicos.....	45

3.4.2.1 Parâmetros de fertilidade do solo.....	45
3.4.2.2 Carbono Orgânico Total (COT).....	46
3.4.2.3 Estoque de carbono orgânico (EC)	46
3.4.3 Atributos Microbiológicos	46
3.4.3.1 Carbono na biomassa microbiana.....	46
3.4.3.2 Respiração Basal.....	47
3.4.3.3 Quocientes metabólico e microbiano	48
3.4.3.4 Atividades Enzimáticas	48
3.4.3.4.1 Fosfatase Ácida	48
3.4.3.4.2 Arilsulfatase	49
3.4.3.4.3 Beta-Glicosidase.....	49
3.5 Produtividade de Colmos	50
3.6 Análise Estatística.....	50
4. RESULTADOS	51
4.1.1 Argila dispersa em água e índice de floculação	51
4.1.2 Densidade do Solo e Porosidade do solo	52
4.1.3 Retenção de água no solo e limites hídricos	56
4.1.4 Condutividade hidráulica	59
4.1.5 Estabilidade de Agregados.....	60
4.1.6 Resistência do solo à penetração	62
4.2 Atributos Químicos.....	63
4.2.1 Parâmetros de fertilidade do solo.....	63
4.3 Indicadores Microbiológicos.....	76
4.3.1 Carbono da biomassa microbiana do solo.....	76
4.3.2 Respiração Basal.....	77
4.3.3 Quociente metabólico e quociente microbiano	78
4.3.4 Atividades Enzimáticas	80
4.3.4.1 Fosfatase Ácida	81
4.3.4.2 Arilsulfatase	82
4.3.4.3 Beta - Glicosidase.....	82
4.4 Produtividade.....	83
4.5 Análise integrada das correlações entre atributos físicos, químicos e biológicos do solo	84
5. DISCUSSÃO	86

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
6. CONCLUSÕES.....	118
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

LISTA DE ABREVIACÕES

AA+GN – Arado de Aiveca + Grade Niveladora
ACP – Fosfatase Ácida
ADA – Argila Dispersa em Água
ARS – Arilsulfatase
BG – Beta Glicosidase
Ca – Cálcio
CBMS – Carbono da Biomassa Microbiana do Solo
CC – Capacidade de Campo
CE – Condutividade Elétrica
COT – Carbono Orgânico do Solo
CTC – Capacidade de Troca Catiônica
DMG – Diâmetro Médio Geométrico
DMP – Diâmetro Médio Ponderado
DS – Densidade do Solo
EC – Estoque de Carbono Orgânico
GI+GN – Grade Intermediária + Grade Niveladora
GN – Grade Niveladora
H+Al – Acidez Potencial
IF – Índice de Flocculação
K – Potássio
Ksat; CH – Condutividade Hidráulica
MACRO – Macroporosidade
Mg – Magnésio
MICRO – Microporosidade
MOS – Matéria Orgânica do Solo
P – Fósforo
PD – Plantio Direto
pH – Potencial de Hidrogeniônico
PMP – Ponto de Murcha Permanente
PT – Porosidade Total

qCO₂ – Quociente Metabólico

qMic – Quociente Microbiano

RB – Respiração Basal

RP – Resistência a Penetração

SA+GN – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora

SB – Soma de Bases

V% - Saturação por Bases

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados cronológicos do histórico da área experimental nos anos de 2013 a 2022...	38
Tabela 2. Parâmetros de fertilidade do solo na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, Frutal-MG, antes da instalação do canavial em 2022.....	38
Tabela 3. Análise de variância para os atributos argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.....	51
Tabela 4. Análise de variância para os atributos densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.....	53
Tabela 5. Análise de variância para os atributos capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	58
Tabela 6. Análise de variância para o atributo condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	59
Tabela 7. Análise de variância para os atributos diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	60
Tabela 8. Análise de variância para o atributo resistência à penetração do solo em laboratório (RP) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.....	62
Tabela 9. Análise de variância para os atributos carbono orgânico (COS) e estoque de carbono orgânico total (EstC).....	63
Tabela 10. Análise de variância para os atributos potencial de hidrogênio (pH), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	65
Tabela 11. Análise de variância para os atributos fósforo (P), potássio (K) e acidez potencial (H+Al) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.....	69
Tabela 12. Análise de variância para os atributos soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	72
Tabela 13. Análise de variância para a condutividade elétrica (CE) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	75
Tabela 14. Análise de variância para o carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	76
Tabela 15. Análise de variância para a respiração basal (RB) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades de avaliação.	77

Tabela 16. Análise de variância para o quociente metabólico (qCO_2) e o quociente microbiano ($qMic$) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	78
Tabela 17. Análise de variância para os atributos fosfatase ácida (ACP), arilsulfatase (ARS) e beta-glicosidase (BG) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização e delineamento da área experimental no estado de Minas Gerais (MG), no município de Frutal, na Fazenda Três Irmãos.	36
Figura 2. Dados meteorológicos mensais (temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), precipitação pluviométrica (mm) e cronograma das etapas experimentais durante os anos de 2022, 2023 e 2024, no município de Frutal (MG). Fonte: Estação Bunge Frutal (2024).	37
Figura 3. Diagrama esquemático do espaçamento entrelinhas, da linha de tráfego de máquinas agrícolas e das profundidades de amostragem do solo (0,00–0,15; 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m) na cultura da cana-de-açúcar.	41
Figura 4. Argila Dispersa em Água do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	52
Figura 5. Índice de Flocculação (IF) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	52
Figura 6. Densidade (DS) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B)	53
Figura 7. Porosidade total (PT) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	54
Figura 8. Macroporosidade (MACRO) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	55
Figura 9. Microporosidade (MICRO) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	55
Figura 10. Curvas médias de retenção de água no solo, na camada de 0,00–0,15 m, em função dos sistemas de preparo do solo e da posição de amostragem.	56
Figura 11. Curvas médias de retenção de água no solo, na camada de 0,15–0,30 m, em função dos sistemas de preparo do solo e da posição de amostragem.	57
Figura 12. Curvas de retenção de água no solo, na camada de 0,30–0,45 m, em função dos sistemas de preparo do solo e da posição de amostragem.	58
Figura 13. Capacidade de campo (CC) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	59

Figura 14. Diâmetro médio geométrico (DMG) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo de solo e das profundidades.....	61
Figura 15. Diâmetro médio ponderado (DMP) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B)	61
Figura 16. Resistência à penetração (RP) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	62
Figura 17. Matéria Orgânica (MOS) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	64
Figura 18. pH em CaCl ₂ do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	66
Figura 19. Cálcio (Ca ²⁺) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	67
Figura 20. Magnésio (Mg ²⁺) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	68
Figura 21. Fósforo (P) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	70
Figura 22. Potássio (K) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	71
Figura 23. Acidez Potencial (H+Al) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	72
Figura 24. Soma de Bases (SB) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	73
Figura 25. Capacidade da Troca Catiônica (CTC) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	74
Figura 26. Saturação por Bases (V%) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	75

Figura 27. Carbono da biomassa microbiana (CBM) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	77
Figura 28. Respiração basal (RB) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	78
Figura 29. Quociente metabólico (qCO_2) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B).	79
Figura 30. Quociente microbiano ($qMic$) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	80
Figura 31. Enzima fosfatase ácida (ACP) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	81
Figura 32. Enzima arilsulfatase (ARS) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	82
Figura 33. Enzima beta-glicosidase (BG) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades.	83
Figura 34. Produtividade da cana-de-açúcar nas safras 2023/24 (A) e 2024/25 (B) cultivado no Latossolo Vermelho-Distrófico em função dos tipos de preparo de solo.....	84
Figura 35. Matriz de correlação de Pearson entre atributos físicos, químicos e biológicos do solo. As cores indicam a intensidade e o sentido das correlações (azul = positiva; vermelho = negativa) e os valores numéricos correspondem aos coeficientes de correlação (r).	Erro!

Indicador não definido.

IMPACTOS DE DIFERENTES PREPAROS NA IMPLANTAÇÃO DO CANAVIAL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO: QUALIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE COLMOS

RESUMO

A intensificação do uso de maquinário no agrossistema canavieiro, caracterizada pelo aumento do tráfego e da carga por eixo dos equipamentos, tem gerado problemas crescentes como a compactação do solo. Neste contexto, o objetivo deste estudo consistiu em avaliar o efeito do preparo do solo e do plantio sobre a palhada na qualidade do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. O experimento foi realizado na Fazenda 3 Irmãos, localizada no município de Frutal, Minas Gerais, em área de Latossolo Vermelho Distrófico, utilizando a variedade de cana-de-açúcar RB966928. O período experimental abrange os anos de 2022 a 2024, com delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial, composto por cinco sistemas de preparo do solo e três profundidades de avaliação (0,00 – 0,15; 0,15 – 0,30; 0,30 – 0,45 m). Os sistemas de preparo do solo para o plantio de cana-de-açúcar foram definidos como: PD – Plantio sobre a palhada; GI+GN – Grade intermediária + grade niveladora; AA+GN – Arado de aiveca + grade niveladora; SA+GN – Subsolador de arrasto + grade niveladora; e GN – Grade niveladora. Avaliaram-se atributos físicos (densidade do solo, porosidade, condutividade hidráulica saturada, resistência à penetração, estabilidade de agregados, argila dispersa em água e índice de floculação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente), químicos (fertilidade, matéria orgânica e carbono orgânico do solo) e biológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal, quocientes microbiano e metabólico e atividades enzimáticas), além da produtividade de colmos. Os dados foram analisados por meio de análise de variância, seguida pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e análise de correlação de *Pearson*. Os sistemas de preparo GN, SA+GN e o PD, proporcionaram maior agregação, evidenciada por maiores valores de diâmetro médio dos agregados e índice de floculação, em comparação ao preparo AA+GN, que apresentou menor estabilidade estrutural. Os sistemas de preparo e a profundidade influenciaram a resistência à penetração e a porosidade do solo, com maiores valores de resistência concentrados na camada superficial, porém abaixo do limite crítico ao crescimento radicular. Os preparos AA+GN e GI+GN elevaram a porosidade total e a macroporosidade, enquanto o PD apresentou menores valores desses atributos. Os preparos com a GN e PD preservaram maiores teores de matéria orgânica, cálcio e magnésio na superfície, refletindo maiores valores de pH e saturação por bases, ao passo que os preparos AA+GN e GI+GN intensificaram a acidez potencial. A atividade microbiológica concentrou-se na camada superficial, independentemente do preparo. A produtividade não diferiu entre os tratamentos. A análise de correlação confirmou a interdependência entre atributos físicos, químicos e biológicos, destacando a matéria orgânica como elemento central da qualidade do solo. Portanto, a ausência de resposta na produtividade, aliada aos benefícios para a qualidade edáfica, posiciona o PD, a GN e o SA+GN como alternativas viáveis para a implantação de canaviais em Latossolos Vermelho Distrófico de textura franco argilo-arenosa.

Palavras-chave: Compactação do Solo, Plantio Direto, *Saccharum officinarum*.

IMPACTS OF DIFFERENT SOIL TILLAGE SYSTEMS ON SUGARCANE ESTABLISHMENT IN A DYSTROPHIC RED LATOSOL: SOIL QUALITY AND STALK YIELD

ABSTRACT

The intensification of machinery use in sugarcane agroecosystems, characterized by increased traffic and axle load of equipment, has generated growing problems such as soil compaction. In this context, the objective of this study was to evaluate the effect of different soil tillage systems and planting over crop residue on soil quality and sugarcane productivity. The experiment was conducted at Fazenda 3 Irmãos, located in the municipality of Frutal, Minas Gerais, Brazil, in an area classified as an Oxisol (Red Latosol), using the sugarcane variety RB966928. The experimental period spanned from 2022 to 2024, with a randomized complete block design (RCBD) in a factorial scheme, consisting of five soil tillage systems and three evaluation depths (0.00–0.15; 0.15–0.30; 0.30–0.45 m). The soil tillage systems for sugarcane planting were defined as: NT – No-tillage over crop residue; IH+LH – Intermediate harrow + leveling harrow; MP+LH – Moldboard plow + leveling harrow; SS+LH – Subsoiler + leveling harrow; and LH – Leveling harrow. Physical attributes (soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, penetration resistance, aggregate stability, water-dispersible clay and flocculation index, field capacity, and permanent wilting point), chemical attributes (fertility parameters, soil organic matter, and soil organic carbon), and biological attributes (microbial biomass carbon, basal respiration, microbial and metabolic quotients, and enzymatic activities), in addition to crop yield, were evaluated. Data were analyzed using analysis of variance, followed by Tukey's test ($p < 0.05$), and Pearson's correlation analysis. The tillage systems NT, LH, and SS+LH promoted greater aggregation and flocculation index, compared to MP+LH, which showed lower structural stability. Tillage systems and depth influenced soil penetration resistance and porosity, with higher resistance values concentrated in the surface layer, although below the critical limit for root growth. The MP+LH and IH+LH treatments increased total porosity and macroporosity, whereas NT showed lower values for these attributes. The LH and NT systems preserved higher levels of organic matter, calcium, and magnesium at the surface, resulting in higher pH values and base saturation, while MP+LH and IH+LH intensified potential acidity. Microbiological activity was concentrated in the surface layer, regardless of tillage system. Yield did not differ among treatments. Correlation analysis confirmed the interdependence among physical, chemical, and biological attributes, highlighting organic matter as a central component of soil quality. Therefore, the absence of a yield response, combined with the benefits to soil quality, positions NT, LH, and SS+LH as viable alternatives for the establishment of sugarcane fields in dystrophic Red Oxisols with sandy clay loam texture.

Keywords: Soil compaction, no-tillage, *Saccharum officinarum*.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do setor sucroenergético brasileiro nas últimas décadas foi decorrente da expansão da área plantada de cana-de-açúcar e da modernização tecnológica, aumentando a eficiência e a competitividade. Com essa expansão, a produção brasileira na safra 2025/26 foi estimada em 666,4 milhões de toneladas, em 8,9 milhões de hectares (Conab, 2025).

A colheita mecanizada no Brasil cresceu expressivamente nas últimas décadas, em decorrência da eliminação da queima para despalha e da consequente substituição da colheita manual. No entanto, essa modernização da colheita apresenta risco de compactação do solo, uma vez que a passagem de colhedoras e transbordos com massa total de 18 a 28 toneladas, cujo o tráfego é repetido durante os ciclos produtivos da cana-de-açúcar, sob condições variáveis de umidade do solo, aumenta o potencial de compactação do solo (Guimarães Júnnyor et al., 2019b).

Paralelamente, observa-se a intensificação do uso de maquinário nos agrossistemas canavieiros, caracterizada pelo aumento do tráfego e da carga por eixo dos equipamentos. Essa intensificação, impulsionada pela busca por maior capacidade operacional, promove impactos negativos na qualidade do solo, levando à degradação estrutural dos solos.

Nesse contexto, a adoção de sistemas de produção mais conservacionistas que minimizam a mobilização do solo, surge como uma estratégia para a mitigação da compactação. Tais sistemas, ao evitar a degradação estrutural, contribuem para a sustentabilidade da atividade canavieira (Silva et al., 2016; Souza et al., 2017).

As estratégias de otimização da produtividade e sustentabilidade estão relacionadas com os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, os quais, por sua vez, são influenciados pelo método de cultivo adotado, incluindo a escolha do sistema de preparo do solo em conjunto com o tipo de maquinário utilizado (Reis; Cortez, 2024).

O preparo convencional do solo na cana-de-açúcar, com subsolagens, arações e gradagens, apresenta impactos negativos, incluindo degradação estrutural do solo, aumento dos custos de produção (consumo de combustível) e emissões de CO₂ (Moitinho et al., 2018). Essa constatação provoca a necessidade de avaliar alternativas de preparo de solo que garantam a produtividade, a sustentabilidade e a qualidade edáfica.

O preparo reduzido do solo, utilizando apenas a subsolagem, tem sido amplamente utilizado nas áreas de reforma da cana-de-açúcar para romper camadas compactadas, promovendo a melhoria das propriedades físicas do solo (Martíni et al., 2024). Essa prática utiliza equipamentos de menor revolvimento para minimizar a perturbação do solo pré-plantio, reduzindo a intensidade do preparo em comparação aos métodos convencionais (Guimarães Júnnyor et al., 2022).

O preparo reduzido destaca-se na cultura canavieira, pois promove a melhoria das propriedades físicas (Oliveira et al., 2022), químicas (Cury et al., 2014) e biológicas do solo (Segnini et al., 2013), reduzindo as emissões de carbono orgânico (Bordonal et al., 2018).

No agroecossistema, o Sistema Plantio Direto (SPD) não constitui um método de preparo do solo, mas um sistema de manejo baseado na ausência de revolvimento, na manutenção de cobertura vegetal e na diversificação de culturas por meio de rotações e sucessões.

No entanto, na cultura da cana-de-açúcar, a necessidade de abertura de sulcos para o plantio promove a perturbação de aproximadamente 30% da superfície do solo (Barbosa et al., 2019), o que dificulta a aplicação do conceito *stricto sensu* de plantio direto. Em função dessa perturbação física localizada, alguns autores classificam o plantio direto na cana-de-açúcar como um sistema conservacionista de baixa intensidade, uma vez que promove a desagregação do solo de forma pontual, em intervalos plurianuais, geralmente entre cinco e seis anos (Bordonal et al., 2018).

Diante desse cenário, Derperch et al. (2024) destacam que esse sistema se enquadra no conceito mais amplo de Agricultura Conservacionista (AC), a qual se fundamenta em três princípios-chave: perturbação mínima do solo; cobertura permanente por biomassa vegetal; e diversificação de culturas, por meio de rotações, sucessões e/ou consórcios, incluindo o uso de plantas de cobertura.

A dinâmica da qualidade do solo pode ser monitorada por meio de índices baseados em atributos físicos, químicos e biológicos, os quais permitem avaliar o estado do sistema de produção e os impactos do uso do solo (Cherubin et al., 2016).

Portanto, a fim de reduzir prejuízos à qualidade do solo, verifica-se a necessidade de realizar planejamento para a escolha do melhor preparo de solo em cada ambiente de produção. Em consonância, as análises dos atributos edáficos poderão orientar na adoção de preparo mais adequado visando à preservação do solo.

1.2 Hipóteses

a) Não há efeito residual dos diferentes tipos de preparo para o cultivo da cana-de-açúcar sobre os atributos físicos do solo após duas colheitas consecutivas.

b) Há efeito residual dos diferentes tipos de preparo para o cultivo da cana-de-açúcar sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo após duas colheitas consecutivas.

c) A produtividade da cana-de-açúcar é semelhante entre os tratamentos de preparo do solo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito de diferentes tipos de preparo do solo e o plantio sobre a palhada na qualidade do solo e na produtividade da cana-de-açúcar.

1.3.2 Objetivos Específicos

a) Testar se os tipos de preparo do solo afetam os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

b) Avaliar se os atributos físicos, químicos e biológicos do solo variam em profundidade.

c) Analisar se os tipos de preparo do solo afetam a produtividade da cana-de-açúcar ao longo de duas colheitas subsequentes.

d) Verificar se há correlações entre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cana-de-açúcar e os efeitos do cultivo sobre o solo

A cana-de-açúcar passa por quatro fases durante seu ciclo de desenvolvimento: brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos. A duração de cada fase não é constante, pois pode variar de acordo com os diferentes fatores ambientais (Marin, 2022).

Cada uma das fases mencionadas acima apresenta distintas exigências climáticas. Por exemplo, na fase de crescimento, é necessário que a temperatura e os recursos hídricos estejam em níveis mais elevados do que na fase de maturação, na qual ocorre o acúmulo de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar (Marin, 2022).

No sistema de produção, a cultura é explorada, em média, por cinco cortes ao longo dos anos. O primeiro ciclo é denominado “cana-planta”, enquanto os ciclos subsequentes são chamados de “cana-soca”. Dessa forma, quando o canavial é manejado adequadamente, há maior probabilidade de prolongamento de sua longevidade, embora essa seja limitada por fatores como condições climáticas e características físicas e químicas do solo (Leme Filho, 2023).

Nesse contexto de intensificação do sistema produtivo, o avanço tecnológico, na busca por maior eficiência e produtividade, viabilizou sistemas de produção que reduziram a necessidade de mão de obra nas etapas de plantio, colheita e carregamento (Vischi Filho et al., 2017).

A mecanização da colheita da cana crua resultou na disponibilidade de palhada, composta por ponteiros, folhas, cascas e fragmentos de colmo triturados e distribuídos sobre o solo pela colhedora. Essa cobertura morta apresenta-se como prática conservacionista, protegendo o solo da erosão hídrica, reduzindo a infestação de plantas invasoras e fornecendo matéria orgânica que melhora a estrutura e fertilidade do solo (Carvalho et al., 2017).

Além disso, a manutenção da palhada sobre o solo reduz a pressão de contato, contribuindo para a preservação da estrutura edáfica e minimizando a compactação (Vischi Filho et al., 2017).

Entretanto, essa intensificação da mecanização, desde o plantio até a colheita, também apresenta pontos negativos, pois acarreta alterações nos atributos físicos do solo,

resultando na redução da porosidade e no aumento da densidade do solo e da resistência à penetração, devido à compactação progressiva ao longo das safras (Cherubin et al., 2021; Jimenez et al., 2021; Oliveira et al., 2022), influenciada pelo intenso tráfego de máquinas pesadas durante o ciclo produtivo, principalmente durante a colheita (Carvalho et al., 2011; Esteban et al., 2019; Guimarães Júnnyor et al., 2019).

Os equipamentos utilizados na colheita da cana-de-açúcar, conforme mencionados por Silva et al. (2016), Guimarães Júnnyor et al. (2019) e Keller et al. (2019), são conhecidos por peso elevado e pequena área de contato com o solo. O peso e a limitada superfície de contato resultam em elevada carga sobre o solo, o que provoca diminuição progressiva da porosidade total e da aeração do solo, impactando negativamente a produtividade e a brotação da cana-soca e contribuindo para a redução da longevidade do canavial, conforme apontado por Esteban et al. (2019), Moraes et al. (2019) e Oliveira et al. (2022).

Diante das transformações do setor sucroenergético nas últimas décadas, em particular a diversificação das usinas, que passaram a atuar não apenas na produção de açúcar, mas também na geração de energia (etanol e bioeletricidade), torna-se evidente a necessidade de aprofundar os estudos sobre a produção de cana-de-açúcar e seus impactos na qualidade do solo.

2.2 Operações de preparos do solo aplicado à produção da cana-de-açúcar

No Brasil, o manejo da cana-de-açúcar atualmente se baseia em três sistemas de preparo do solo: convencional, mínimo e plantio direto (Farhate et al., 2020). Conceitualmente, o preparo do solo consiste no manejo da estrutura edáfica, modificando seus atributos iniciais para otimizar as condições de produção desejadas (Betancur-Corredor et al., 2022).

O sistema de preparo convencional do solo fundamenta-se na execução sequencial de operações mecânicas intensivas, incluindo subsolagem, aração e gradagem, com o objetivo de promover a mobilização e a desagregação das camadas superficiais e subsuperficiais do perfil edáfico. Todavia, o tráfego recorrente de máquinas agrícolas associado a essas operações, aliado à circulação de colhedoras, equipamentos de transbordo e pulverizadores, exerce elevada pressão sobre o solo, configurando-se como

um dos principais agentes indutores da compactação (Silva et al., 2016; Guimarães Júnnyor et al., 2019; Esteban et al., 2024).

Em resposta a esse processo, a adoção sistemática de implementos descompactadores, como os subsoladores, torna-se prática recorrente, resultando no incremento substancial dos custos operacionais do preparo do solo (Amorim, 2019).

Logo, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar caracteriza-se por elevado grau de mecanização, abrangendo desde as operações iniciais de preparo do solo até as etapas finais de colheita (Silva et al., 2018; Barbosa et al., 2019; Guimarães Júnnyor et al., 2019; Esteban et al., 2020).

A utilização de máquinas agrícolas de grande porte e elevada massa, associada ao tráfego repetitivo ao longo dos sucessivos ciclos da cultura, impõe significativas tensões mecânicas ao solo, favorecendo, de forma cumulativa, a degradação de sua estrutura (Silva et al., 2016; Castioni et al., 2018; Silva et al., 2018; Barbosa et al., 2019; Keller et al., 2019; Castioni et al., 2021).

Dessa forma, do plantio à colheita, incluindo os tratos culturais, estima-se a realização de mais de 30 operações mecanizadas na mesma área ao longo de cinco anos (De Maria et al., 2016).

Segundo Rossini (2014), cada faixa de tráfego recebe uma carga equivalente à metade da massa total das máquinas a cada passada, considerando duas passadas por ciclo de cada equipamento. Nesse contexto, são utilizados: uma colhedora (15 t), um trator de 149 hp (8 t), dois transbordos (6,5 t cada) e um trator de 115 hp (6,7 t).

Com essa composição, ao longo de seis cortes e considerando a capacidade de transporte de 5 toneladas de colmos por transbordo, o tráfego acumulado pode resultar em uma carga total equivalente de até 388 t, concentrada na faixa de rodado (Bolonhezi et al., 2019).

Como consequência, observa-se uma tendência ao aumento expressivo da compactação do solo ao final dos ciclos produtivos (Souza et al., 2014; Esteban et al., 2020), a qual se reflete, a cada corte, em reduções da produtividade agrícola (Gomes; Bajay, 2017; Esteban et al., 2019).

Assim, a busca pelo aumento da produtividade agrícola, impulsionada pela intensificação da mecanização (Geris et al., 2021), tem gerado impactos negativos na qualidade do solo. A análise dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, em conjunto com a produtividade, revela que a mecanização excessiva compromete a

estrutura edáfica, dificulta o desenvolvimento radicular, especialmente nas camadas superficiais, e aumenta a vulnerabilidade a processos erosivos e de degradação (Lovera et al., 2021; Biberdzic et al., 2020).

Diante disso, manejos agrícolas intensivos resultam em modificações da matéria orgânica, alterando a capacidade de troca catiônica (CTC) e o pH do solo, além de comprometerem sua estrutura, particularmente nas camadas superficiais, com impactos cumulativos a longo prazo (Muhammad et al., 2018).

Conclusivamente, a seleção do sistema de preparo do solo contribui para melhoria da estrutura, da agregação, da disponibilidade hídrica, da porosidade, do acúmulo de matéria orgânica e da proteção edáfica (Amami et al., 2021). Sistemas com menor grau de revolvimento e menor intensidade de mecanização demonstram superioridade em termos de benefícios para o solo e para a produção agrícola (Claassen et al., 2018).

O Brasil detém a maior área mundial dedicada ao sistema plantio direto, abrangendo 33 milhões de hectares (Vizioli et al., 2021).

Esse sistema, baseado na mínima perturbação e cobertura do solo, promove a reciclagem de compostos orgânicos, reduz a manipulação da estrutura do solo e, em última análise, melhora a saúde do solo e a infiltração de água. Ao minimizar a perturbação do solo, o plantio direto reduz o escoamento superficial e a erosão, protegendo a qualidade da água e a fertilidade do solo, e contribuindo para o aumento da biodiversidade no ecossistema do solo (Salomão et al., 2019).

Esse sistema conservacionista, caracterizado pela ausência de revolvimento mecânico do solo e pela manutenção da cobertura vegetal, apresenta-se como alternativa ao sistema convencional de preparo. Essa prática favorece o aumento e a preservação do carbono orgânico (Aji et al., 2021; Guo et al., 2021), a proteção contra a manipulação e a redução do impacto da mecanização na estrutura do solo.

No entanto, o plantio direto, se praticado por longos períodos sem manejo adequado para mitigar a compactação, pode levar ao aumento da densidade do solo (Sokolowski et al., 2020; Li et al., 2022).

O cultivo mínimo, apresenta-se como solução para a compactação do solo em canaviais, reduzindo a mobilização do solo por meio de implementos como subsoladores e escarificadores (He et al., 2021).

Esse sistema, configura-se como alternativa ao preparo convencional (Schluter et al., 2018). Suas diretrizes, que preconizam o mínimo de revolvimento do solo e a

manutenção dos resíduos culturais, promovem a melhoria de seus atributos físicos, químicos e biológicos.

Dentre esses atributos, destacam-se a estabilidade dos agregados, a infiltração da água e a biomassa microbiana (Romero et al., 2021), fatores que influenciam positivamente a ciclagem de nutrientes (Papadopoulos et al., 2023; Souza et al., 2023). Além disso, a cobertura do solo com resíduos culturais reduz o impacto da mecanização e protege contra processos erosivos (Githongo et al., 2021).

Nesse contexto, Nagahama et al. (2016) destacam que o preparo mínimo realizado por meio da escarificação figura entre as práticas de manejo que promovem menores alterações na estrutura do solo, contribuindo para a mitigação localizada de processos de compactação, além de favorecer o incremento da porosidade e a redução da densidade do solo.

Corroborando esses resultados, Shukla et al. (2020), ao avaliarem a produtividade da cana-de-açúcar sob a adoção do cultivo mínimo com subsolagem, constataram incrementos significativos na produção de colmos ($96,32 \text{ Mg ha}^{-1}$) e de açúcar ($12,14 \text{ Mg ha}^{-1}$), quando comparados ao sistema convencional de preparo do solo com arado de aiveca.

Em grande parte das áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar no Brasil, os resíduos culturais permanecem depositados sobre a superfície do solo; entretanto, o preparo convencional (PC) ainda é amplamente empregado durante a fase de renovação dos canaviais. Tal prática pode comprometer os efeitos benéficos da manutenção da palhada sobre o solo e sobre o acúmulo de carbono orgânico do solo (SOC) (Cerri et al., 2011). Nesse cenário, a adoção de práticas mais conservacionistas, como o preparo reduzido e/ou o sistema de plantio direto, configura-se como uma estratégia de manejo promissora para a ampliação do sequestro de SOC em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Segnini et al., 2013; Tenelli et al., 2019).

Em avaliações do desempenho agrônômico da cultivar de cana-de-açúcar SP 81-3250, conduzidas em Latossolo Vermelho distroférico, na região de Rio Brillhante, Estado de Mato Grosso do Sul, sob diferentes sistemas convencionais de preparo do solo, Silva Júnior et al. (2013) constataram que o preparo mínimo associado às operações de gradagem e aração resultou em menores produtividades de colmos e valores de Pol, quando comparado aos demais sistemas avaliados. Em contraposição, Tavares et al. (2010) relataram que os tratamentos conduzidos sob preparo convencional e cultivo

mínimo não apresentaram diferenças estatisticamente significativas quanto à produtividade agrícola.

Em investigação conduzida por Arcoverde et al. (2019), na qual foram analisados o crescimento e a produtividade de diferentes cultivares de cana-de-açúcar sob sistemas de preparo reduzido e plantio direto, verificaram-se os maiores incrementos nas taxas de alongamento diário dos colmos, na produtividade de colmos e nos teores de açúcar no sistema de plantio direto. Tais resultados foram atribuídos às condições físicas mais favoráveis do solo, notadamente à menor resistência mecânica à penetração e à maior disponibilidade hídrica no perfil edáfico.

Não obstante, merecem destaque os resultados reportados por Arruda et al. (2016), que investigaram os efeitos dos sistemas de preparo do solo sobre os atributos físicos, especificamente densidade e porosidade. Os autores constataram que, independentemente do manejo adotado, ocorre redução progressiva do volume total de poros e da macroporosidade ao longo do ciclo produtivo da cana-soca, concomitantemente ao incremento da densidade do solo na camada subsuperficial de 0,40–0,60 m, configurando evidências consistentes de processos de compactação.

Adicionalmente, a adoção do sistema de plantio direto em áreas cultivadas com cana-de-açúcar enfrenta limitações de ordem operacional, sobretudo em função das dimensões do sulco de plantio, o qual promove a mobilização de aproximadamente 30% da superfície do solo na camada de 0,00–0,30 m. Essa condição compromete a plena aplicação do princípio da ausência de revolvimento do solo em sua totalidade (Bordonal et al., 2018). Diante desse cenário, torna-se imperativa a condução de estudos voltados ao desenvolvimento e à validação de sistemas de cultivo mínimo que minimizem ou eliminem o revolvimento do solo durante o estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar, conforme salientado por Arruda et al. (2016).

2.3 Qualidade e saúde do solo

O conceito de saúde do solo é abrangente, complexo e emergente, requerendo uma abordagem integrada do solo para sua compreensão e aplicação adequada. A saúde do solo refere-se à capacidade contínua do solo, como um ecossistema vivo, de desempenhar suas múltiplas funções. Essas funções englobam o suporte à produção de alimentos, fibras e biocombustíveis, a ciclagem de nutrientes, o sequestro de carbono, habitat para a

biodiversidade, a regulação do fluxo de água e a disponibilidade de recursos para indústrias como a farmacêutica, cosmética e construção civil (Cherubin; Schiebelbein, 2022).

Devido à sua relevância global e atual, a produção de conhecimento técnico-científico sobre os conceitos, métricas (indicadores) e práticas de manejo da saúde do solo tem progredido rapidamente, especialmente nos últimos dez anos. A saúde do solo tem sido reconhecida como uma área de vanguarda na ciência do solo (Shen; Teng, 2023).

Ao longo das últimas cinco décadas, houve uma importante evolução conceitual na Ciência do Solo, que culminou no conceito de saúde do solo, o qual tem sido difundido de forma mais intensa na última década. Nesse processo, houve uma transição gradual do conceito de qualidade do solo para saúde do solo.

No início dos anos 1970, o conceito de qualidade do solo estava principalmente relacionado à aptidão agrícola. Era baseado em informações sobre o ambiente físico, como tipo de solo, relevo e condições climáticas, para determinar a aptidão potencial da área para uso agrícola (Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2023). Foi nessa década que o termo "qualidade do solo" surgiu na literatura, sendo definido por Mausel (1971) como a capacidade de um solo suportar altas produtividades de grãos sob condições de alto nível tecnológico de manejo. Nos anos seguintes, com o avanço da Revolução Verde e o consequente uso de insumos sintéticos, como fertilizantes e defensivos agrícolas, o foco da qualidade do solo passou a se concentrar exclusivamente na produtividade das culturas.

Na década de 1990, ocorreram avanços significativos no entendimento dos conceitos e métricas de qualidade do solo. Esses avanços foram documentados em publicações como o Relatório do Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos (NRC, 1993), os trabalhos de Doran et al. (1994) e Doran e Jones (1996). Nesse período, o conceito de qualidade do solo foi expandido para incorporar os pilares do meio ambiente e da saúde humana.

Formalmente, a qualidade do solo passou a ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade biológica de plantas e animais, manter a qualidade ambiental do ar e da água, e promover a saúde humana e a habitação (Karlen et al., 1997). Esse conceito ampliado se tornou amplamente difundido em todo o mundo e continua sendo relevante e utilizado até os dias de hoje.

De fato, nos últimos anos, os avanços teóricos e tecnológicos, como as técnicas de biologia molecular, têm contribuído para um melhor entendimento do papel do componente biológico do solo. Hoje em dia, sabe-se que a grande maioria dos processos que ocorrem no solo é mediada, direta ou indiretamente, pela biota do solo (Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2023).

Essa compreensão do solo como um ecossistema vivo, que abriga cerca de 25% da biodiversidade do planeta, tem impulsionado uma transição do termo "qualidade do solo" para "saúde do solo". Essa mudança reflete a visão de que o solo é uma entidade viva multifuncional, que sustenta a vida e, portanto, deve ter seus direitos de saúde protegidos e restaurados (Lal, 2019).

Embora muitas vezes usados como sinônimos, "qualidade do solo" e "saúde do solo" possuem escopos distintos. Lehmann et al. (2020) defendem que a saúde do solo transcende a saúde humana, integrando metas de sustentabilidade mais amplas, como a saúde do planeta, abrangendo questões como perda de biodiversidade, contaminações e mudanças climáticas. A qualidade do solo, por sua vez, foca geralmente nos serviços ecossistêmicos relevantes para o ser humano.

Em última análise, o conceito de saúde do solo facilita a comunicação e a conscientização da sociedade sobre a importância de solos saudáveis para alcançar a saúde de plantas, animais, pessoas e ecossistemas, contribuindo para um planeta saudável. Portanto, a saúde do solo amplia o entendimento da qualidade do solo, abordando questões mais amplas de sustentabilidade e promovendo uma visão holística dos solos como um recurso vital para o bem-estar global (Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2023).

Embora seja amplamente utilizado e reconhecido, o conceito de saúde do solo ainda é objeto de debate e, conseqüentemente, está em constante evolução (Powlson, 2020; Janzen et al., 2021; Harris et al., 2022). Vale ressaltar que, ambos os conceitos têm o mesmo enfoque e utilizam procedimentos similares em diferentes métodos de avaliação. Neste presente estudo, não são utilizados com o mesmo significado a termo da diferença entre os escopos.

2.4 Atributos indicadores da qualidade do solo

A avaliação da qualidade do solo combina as três áreas da ciência do solo - física, química e biológica, compreendendo suas interações e integrando suas propriedades.

Portanto, as avaliações baseadas em apenas um ou dois desses parâmetros de solo de forma isolada não estão alinhadas com o conceito completo de qualidade do solo. O objetivo principal da avaliação da qualidade do solo é compreender o solo de maneira holística, como um sistema complexo e dinâmico (Rinot et al., 2019), uma vez que a interpretação dos processos de produção agrícola, restauração de áreas degradadas ou conservação de áreas naturais deve ser investigada considerando diferentes perspectivas.

No entanto, é difícil determinar qual é o melhor atributo entre os diversos disponíveis, sendo necessário combinar diferentes parâmetros para obter dados confiáveis sobre a qualidade do solo. Esse comportamento está associado ao fato de que diferentes condições ambientais, como regime climático, sistema de manejo adotado, disponibilidade de oxigênio, além da composição da fauna e da flora edáficas, demandam a utilização de indicadores e atributos específicos para a adequada avaliação do solo (Silva et al., 2021).

Em função dessa heterogeneidade, os indicadores podem apresentar variações expressivas entre áreas distintas, mesmo quando submetidas a práticas semelhantes. Ainda que esses fatores sejam considerados, não há, até o momento, um modelo operacional que seja simultaneamente simples, plenamente confiável e isento de incertezas para a avaliação da qualidade do solo. Dessa forma, a seleção dos indicadores deve estar alinhada aos objetivos da análise e à finalidade de uso do solo. A literatura aponta como critérios relevantes para essa escolha a representatividade funcional do indicador, a viabilidade operacional de sua mensuração e sua sensibilidade às variações climáticas e aos sistemas de manejo (Silva et al., 2021).

Nesse contexto, recomenda-se a compartimentação da área de estudo em ecorregiões com características semelhantes quanto aos aspectos hídricos, vegetacionais e edáficos, o que permite uma seleção mais criteriosa e coerente dos indicadores a serem empregados (Araújo et al., 2012). Adicionalmente, a integração de atributos químicos, físicos e biológicos é amplamente indicada, pois possibilita uma avaliação mais abrangente e consistente da qualidade do solo. Essa abordagem integrada subsidia a definição de estratégias voltadas à conservação, correção, mitigação de impactos e recuperação desse recurso natural (Velasquez; Lavelle, 2019; Nkongolo; Narendrula-Kotha, 2020).

2.5.1 Atributos físicos

A análise dos efeitos do manejo sobre os atributos físicos do solo requer a consideração de variáveis associadas à sua textura, incluindo a constituição granulométrica e o sistema poroso, além de propriedades relacionadas à dinâmica da água, ao grau de compactação, expressa pela densidade do solo e pela resistência mecânica à penetração, e à organização estrutural, representada pelo nível de agregação (Chaveiro et al., 2022; Mantovanelli et al., 2022).

A textura do solo resulta da proporção relativa das frações areia, silte e argila, as quais condicionam o arranjo, o tamanho e a disposição das partículas sólidas. Essa configuração influencia diretamente a formação e a distribuição dos poros, definidos como os espaços interparticulares que podem ser ocupados por ar ou água. Solos com maior teor de areia, por exemplo, tendem a apresentar maior volume de macroporos em razão do menor grau de ajuste entre as partículas, enquanto o aumento da fração argilosa favorece um empacotamento mais eficiente, resultando em menor porosidade total (Momoli et al., 2022).

Nesse contexto, a textura constitui um atributo associado à capacidade de retenção e condução de água no solo, bem como ao crescimento do sistema radicular e à distribuição de nutrientes no perfil, exercendo influência direta sobre processos ecológicos e pedogenéticos (Momoli et al., 2022). Cabe destacar que a classe textural é considerada uma característica relativamente estável, apresentando pouca variação ao longo do tempo, mesmo sob diferentes sistemas de uso e manejo (Stefanoski et al., 2013).

Logo, a física do solo exerce influência direta sobre o adequado desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, ao afetar o crescimento do sistema radicular, bem como os processos de absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, a produtividade agrícola (Otto et al., 2011; Cherubin et al., 2016c).

Solos de textura arenosa, por apresentarem menor capacidade de retenção hídrica e nutricional, tendem a induzir o aprofundamento do sistema radicular como estratégia da planta para acessar e suprir suas demandas por esses recursos (Barbosa et al., 2018; Parahyba et al., 2019). Nesse contexto, comparativamente aos solos de textura argilosa, os solos arenosos geralmente apresentam maior biomassa radicular (Otto et al., 2014; Carvalho et al., 2017b; Rossi Neto et al., 2018).

Em contraste, solos de textura argilosa caracterizam-se por elevada capacidade de retenção de água e nutrientes, o que favorece uma distribuição mais superficial das raízes ao longo do perfil do solo, uma vez que a arquitetura radicular é fortemente condicionada pela disponibilidade desses recursos no ambiente edáfico (Barbosa et al., 2018; Luz et al., 2020).

Grande et al. (2025) demonstraram que raízes de maior diâmetro (1–2 mm) apresentam maior tolerância ao estresse mecânico do solo, sendo menos afetadas pela compactação em comparação às raízes mais finas (<1 mm).

De forma geral, sistemas radiculares mais desenvolvidos conferem às plantas maior capacidade de exploração do volume de solo (Esteban et al., 2019). Entretanto, o desempenho produtivo não depende exclusivamente da quantidade de raízes, mas sobretudo de sua distribuição ao longo do perfil do solo durante o ciclo da cultura.

Conforme descrito por Van Antwerpen et al. (2022), ao se depararem com camadas ou estruturas de elevada resistência mecânica, as raízes tendem a desviar seu crescimento, contornando o obstáculo, em vez de penetrá-lo. Esse comportamento é particularmente evidente quando o sistema radicular encontra camadas compactadas, o que limita a profundidade de enraizamento.

Na cultura da cana-de-açúcar, o crescimento radicular não é significativamente afetado em condições de resistência do solo à penetração inferiores a 0,75 MPa, apresenta redução acentuada em valores entre 0,75 e 2,0 MPa e torna-se severamente restrito quando a resistência ultrapassa 2,0 MPa (Otto et al., 2011).

Sá et al. (2016) destacam que a literatura científica não apresenta consenso quanto aos valores de resistência mecânica do solo à penetração considerados limitantes ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, em função da ampla variabilidade dos valores de resistência à penetração relatados.

Os autores ressaltam que, sob condições químicas adequadas, com teor de umidade favorável e porosidade suficiente para permitir a difusão de oxigênio, o sistema radicular pode apresentar adaptações morfológicas e se desenvolver por meio de zonas de menor resistência, mesmo em solos que apresentam elevados valores de resistência mecânica à penetração.

De forma complementar, Portugal et al. (2010) enfatizam que os níveis críticos de resistência do solo ao crescimento vegetal variam conforme o tipo de solo e a espécie

cultivada, tornando complexa a definição de limites críticos, uma vez que esses valores são influenciados, entre outros fatores, pela densidade e pelo estado hídrico do solo.

Assim, a compactação do solo constitui outro parâmetro físico de relevância a ser avaliado. Cabe ressaltar, entretanto, que, ao longo das últimas seis décadas, houve incremento na massa dos equipamentos agrícolas. Nesse período, as cargas aplicadas às rodas das colhedoras elevaram-se de aproximadamente 1,5 Mg, em 1960, para cerca de 9,0 Mg, em 2019, enquanto as cargas exercidas pelas rodas dos tratores aumentaram de cerca de 1,0 Mg, em 1955, para valores superiores a 4,0 Mg em 2019 (Keller et al., 2019).

O tráfego agrícola intensivo promove o aumento da compactação do solo, reduz a porosidade total e limita a circulação de ar e água no perfil, o que, por consequência, compromete o desenvolvimento radicular e a produtividade das culturas (Esteban et al., 2019; Guimarães Júnnyor et al., 2019; Lovera et al., 2021; Luz et al., 2022; Oliveira et al., 2022).

Na cultura da cana-de-açúcar, a compactação do solo é reconhecida como um fator restritivo ao incremento da produtividade, o que tem impulsionado o setor sucroenergético à busca por alternativas de preparo do solo e sistemas de manejo capazes de mitigar esses efeitos, promover melhorias no desempenho produtivo dos canaviais e ampliar sua competitividade no mercado (Marasca et al., 2015; Oliveira et al., 2019).

Esse contexto evidencia a relevância da obtenção de informações acuradas e detalhadas sobre os atributos do solo, as quais subsidiam a tomada de decisão quanto ao manejo das culturas (Peluco et al., 2013). Entre esses atributos, a resistência do solo à penetração, a densidade e a porosidade têm sido priorizadas na avaliação de sistemas de uso e manejo, por estarem diretamente relacionadas ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas (Cherubin et al., 2016b; Resende et al., 2022).

Segundo Reichert et al. (2018), sob uma mesma energia de compactação, a densidade do solo apresenta dependência direta do seu teor de água. O aumento da umidade promove elevação progressiva da densidade até o atingimento de um ponto crítico, no qual se observa a densidade máxima do solo; a partir desse limiar, incrementos adicionais de umidade resultam em redução da densidade. Ademais, atributos como o teor de carbono orgânico e o conteúdo de argila exercem influência significativa sobre os valores de densidade máxima do solo.

Estudos têm demonstrado que práticas de manejo baseadas no revolvimento do solo com o objetivo de atenuar a compactação apresentam efeitos transitórios, com

benefícios restritos, em geral, ao ciclo da cana-planta e à primeira soca em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Bangita; Rao, 2012; Barbosa et al., 2019; Lima et al., 2022).

De modo semelhante, Chamen et al. (2015) verificaram que intervenções mecânicas, como a subsolagem e a escarificação, produzem respostas de curta duração e nem sempre se mostram eficazes na mitigação da compactação do solo. Tais evidências são atribuídas à capacidade intrínseca do solo de reorganizar sua estrutura após a perturbação, restabelecendo novo estado de equilíbrio próximo à condição anterior, processo conceituado como resiliência do solo (Blanco-Canqui; Lal, 2010).

Elevados níveis de compactação exercem impactos significativos sobre os atributos, processos e funções do solo (Cherubin et al., 2021), promovendo o aumento da densidade do solo (Guimarães Júnnyor et al., 2019) e da resistência mecânica à penetração radicular (Arruda et al., 2021; Resende et al., 2022).

Como consequência, ocorre a redução da porosidade total (Braunack; McGarry, 2006; Toledo et al., 2021), da taxa de infiltração de água (Bangita; Rao, 2012) e da condutividade hidráulica do solo, bem como a limitação da difusão de gases no perfil edáfico (Cherubin et al., 2016b; Luz et al., 2020).

Assim, quando as funções físicas do solo atingem limiares críticos, o crescimento e a expansão do sistema radicular são comprometidos (Otto et al., 2011; Moraes et al., 2018), resultando em reduções expressivas no rendimento das culturas (Souza et al., 2014; Esteban et al., 2019).

A compactação do solo corresponde ao processo caracterizado pela redução do volume de solos não saturados em resposta à aplicação de uma pressão externa, a qual pode decorrer do tráfego de máquinas e implementos agrícolas, veículos de transporte ou do pisoteio animal. Sob a perspectiva da Pedologia, esse fenômeno é compreendido como uma modificação no arranjo estrutural das partículas que compõem o solo, resultando em alterações na sua organização física (Camargo; Alleoni, 1997).

Os agregados do solo correspondem a associações estáveis de partículas primárias (areia, silte e argila) que se mantêm coesas e passam a atuar mecanicamente como uma única unidade estrutural (Soares et al., 2018). A organização e a distribuição dos agregados em diferentes classes de tamanho exercem influência direta sobre processos edáficos, como a emergência de plântulas e o desenvolvimento do sistema radicular,

sendo, por esse motivo, amplamente empregadas como indicadores das condições estruturais e da qualidade do solo (Zeng et al., 2018).

Nesse contexto, no âmbito dos atributos químicos do solo, destaca-se como principal efeito do preparo do solo a redução dos teores de matéria orgânica (Kunde et al., 2018; Luz et al., 2019; Pang et al., 2021), o que compromete sua função como agente cimentante no processo de formação e estabilização dos agregados, especialmente em solos de textura média e arenosa.

Como consequência, solos com estrutura degradada apresentam maior suscetibilidade ao escoamento superficial e ao desencadeamento de processos erosivos (Cherubin et al., 2016a). A redução do espaço poroso, associada à diminuição da capacidade de infiltração da água, favorece o acúmulo de água na superfície do solo, aumentando o transporte de partículas e, conseqüentemente, as perdas de solo por erosão.

Estudos que compararam a perda de solo sob diferentes usos do solo, incluindo cana-de-açúcar, pastagens e vegetação nativa, verificaram maiores taxas de erosão em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Youlton et al., 2016; Anache et al., 2018; Gomes et al., 2019), evidenciando o potencial desse sistema de uso em intensificar processos erosivos e contribuir para a degradação dos recursos naturais.

Tradicionalmente, as alterações na qualidade física do solo têm sido avaliadas a partir de atributos associados à sua estrutura, com destaque para a distribuição do tamanho dos agregados, a qual é comumente expressa pelo diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) (Cavalcanti et al., 2020).

As variações na estabilidade dos agregados podem ser utilizadas como indicadores dos processos de degradação ou de recuperação do solo (Laskar et al., 2021; Li et al., 2021), uma vez que refletem as condições estruturais e físicas do sistema edáfico. Esses atributos estão diretamente relacionados à aeração, à infiltração de água e à capacidade do solo em resistir à ação de processos erosivos (Kraemer et al., 2021; Cherubin et al., 2016b).

Além de constituir um indicador direto da qualidade e da saúde do solo, a estabilidade dos agregados apresenta estreita relação com a erodibilidade, uma vez que a desagregação promovida pela ação da água da chuva representa a etapa inicial do desenvolvimento dos processos erosivos (Liu et al., 2021).

Segundo Cavalcante et al. (2020) e Castioni et al. (2018), os menores teores de carbono orgânico observados em solos cultivados com cana-de-açúcar nos respectivos

estudos influenciaram a distribuição do tamanho dos agregados e comprometeram a manutenção da estrutura do solo.

Outros fatores que contribuem para a intensificação da degradação dos agregados em áreas cultivadas com cana-de-açúcar estão associados à maior exposição do solo aos agentes erosivos durante os períodos de entressafra, quando há ausência de cobertura vegetal, bem como às operações de preparo do solo, que promovem a desagregação da estrutura edáfica. Esses fatores atuam de forma conjunta, favorecendo a ruptura dos agregados e o desenvolvimento e intensificação de processos erosivos, especialmente do tipo laminar e em sulcos. Tais processos foram observados em diferentes setores da área de estudo analisada por Marcotto, Silveira e Fontona (2021), contribuindo para o assoreamento do curso d'água localizado a jusante da topossequência.

Martinelli e Filoso (2008) reforçam essa interpretação ao indicarem que as maiores perdas de solo ocorrem em períodos nos quais a superfície permanece desprotegida, como durante a entressafra, nos meses iniciais após o plantio e nas fases de renovação dos canais, quando o preparo do solo resulta em intensa fragmentação estrutural e exposição prolongada do solo. Esse processo de degradação é intensificado quando a condição de solo descoberto coincide com períodos de maior precipitação, favorecendo o aumento da quantidade de sedimentos erodidos e transportados para os cursos de água.

Em Latossolos, estudos indicam que, embora o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) aponte a predominância de agregados de maior tamanho nos horizontes superficiais, essa condição não está necessariamente associada à melhor qualidade estrutural do solo (Bertol et al., 2004). A ocorrência de agregados grandes e compactados pode alterar a distribuição do sistema poroso, restringindo a movimentação de água no perfil (Conte et al., 2011). Nesse contexto, agregados formados sob a ação de implementos agrícolas tendem a apresentar menor estabilidade quando comparados àqueles originados por processos naturais de agregação.

A curva de retenção de água no solo constitui um instrumento central na física do solo, pois permite caracterizar os processos de armazenamento e percolamento da água ao longo do perfil edáfico. Por meio dessa relação, é possível inferir a distribuição do tamanho dos poros e a condutividade hidráulica em condições não saturadas, sendo sua forma determinada por atributos intrínsecos do solo, como a mineralogia da fração argila,

a morfologia e o arranjo das partículas, bem como a composição e a concentração dos solutos presentes (Silva et al., 2018b).

Dessa forma, a curva de retenção de água no solo constitui a base para a determinação dos teores de umidade correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, parâmetros fundamentais para a avaliação da disponibilidade hídrica às plantas. A capacidade de campo (CC) é definida como o conteúdo de água que permanece retido no solo após a remoção do excesso por drenagem gravitacional, constituindo a quantidade de água efetivamente acessível às plantas. Por sua vez, o ponto de murcha permanente (PMP) representa o nível de umidade do solo no qual a extração de água pelas plantas se torna inviável, ocasionando o murchamento irreversível das folhas (Luz et al., 2020).

A matéria orgânica do solo influencia a retenção de água, promovendo maior incremento no teor de umidade associado à capacidade de campo em relação ao ponto de murcha permanente. Em decorrência disso, ocorre aumento da disponibilidade de água às plantas, com implicações para o manejo da irrigação. Entretanto, esse efeito varia em função da textura do solo e dos teores iniciais de matéria orgânica presentes no sistema (Lal, 2020).

Nesse contexto, Minasny e McBratney (2018) indicam que a influência da matéria orgânica do solo sobre a retenção de água apresenta maior intensidade em solos de textura arenosa, reduzindo-se em solos siltosos e sendo menos evidente em solos argilosos.

A retenção e o movimento da água no solo estão diretamente associados às características do sistema poroso, cuja estabilidade e distribuição ao longo do perfil edáfico condicionam o comportamento hídrico do solo (Libardi, 2010).

Nesse sentido, Ribeiro et al. (2007) constataram maiores valores de condutividade hidráulica em condição de saturação em solos que apresentaram menores valores de densidade e maior porosidade total, refletindo uma organização estrutural mais favorável. Desse modo, as variações observadas na condutividade hidráulica do solo saturado, na densidade do solo, na porosidade total e no índice de vazios podem ser explicadas pelas diferenças na distribuição do tamanho dos poros nos solos analisados.

Silva et al. (2018) observaram, em solos de textura arenosa, redução da condutividade hidráulica em condição de saturação com o aumento da profundidade, associada ao incremento da densidade do solo e do volume de microporos. Os autores identificaram correlação positiva entre a condutividade hidráulica saturada e as frações

granulométricas areia grossa e areia média, enquanto foi constatada correlação negativa com a capacidade de água disponível. Por sua vez, a capacidade de água disponível apresentou relação linear negativa com as frações areia grossa e areia média e relação linear positiva com o volume de microporos, evidenciando a influência da distribuição do tamanho dos poros sobre o comportamento hídrico do solo.

De acordo com Freitas et al. (2017), os atributos empregados na inferência da qualidade do solo não devem ser analisados de forma isolada, especialmente no que se refere à avaliação de suas propriedades físicas. Esses indicadores devem ser interpretados de maneira integrada, pois contribuem para a compreensão das limitações e potencialidades inerentes a cada tipo de solo, subsidiando práticas adequadas de manejo e estratégias de conservação (Brady; Weil, 2013).

Nesse contexto, a utilização de ferramentas físicas na avaliação da qualidade do solo se justifica por sua capacidade de expressar o suporte à produtividade ambiental, além de quantificar propriedades que atuam como critérios diagnósticos na caracterização e classificação de ecossistemas submetidos a diferentes níveis de perturbação antrópica (Reis Junior et al., 2002).

Dessa forma, a avaliação temporal dos atributos físico-hídricos do solo possibilita mensurar não apenas a intensidade, mas também a persistência das modificações decorrentes da adoção de distintos sistemas de manejo (Reichert et al., 2009; Esteban et al., 2019).

2.4.2 Atributos químicos

Na literatura voltada à avaliação da qualidade do solo, os atributos químicos mais frequentemente utilizados incluem o potencial hidrogeniônico (pH), a condutividade elétrica (CE), a capacidade de troca catiônica (CTC), o teor de matéria orgânica do solo (MOS), a saturação por bases, expressa em porcentagem, e a presença de elementos potencialmente fitotóxicos, com destaque para o alumínio na forma trivalente (Al^{3+}).

O potencial hidrogeniônico (pH) do solo, definido pela atividade dos íons hidrogênio (H^+) presentes na solução do solo, constitui um dos principais indicadores químicos de sua qualidade. Esse atributo exerce influência direta sobre diversos processos edáficos, incluindo a dinâmica e a estruturação das comunidades microbianas, bem como a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas (Allen; Singh; Dalal, 2011).

A disponibilidade de diversos macronutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, potássio e magnésio, é favorecida em faixas adequadas de pH do solo. Por se tratar de um atributo químico de mensuração relativamente simples, o pH pode ser determinado por meio de instrumentos específicos, como o pHmetro (Cotrim et al., 2022).

No contexto edafoclimático brasileiro, grande parte das ecorregiões apresenta solos naturalmente ácidos, com valores de pH próximos a 5, em decorrência do elevado grau de intemperismo e da baixa reserva de bases trocáveis. Entretanto, culturas de ampla importância econômica e alimentar, a exemplo da soja, do trigo, da cana-de-açúcar e do algodão, apresentam melhor desempenho produtivo em solos com menor acidez, o que torna imprescindível a adoção de práticas corretivas visando à elevação do pH e ao incremento da produtividade agrícola (Cotrim et al., 2022).

Nos sistemas de produção da cana-de-açúcar, a acidificação do solo tem sido associada não apenas à redução do teor de sacarose, mas também à limitação do acúmulo de biomassa e da produtividade agrícola da cultura (Resende et al., 2006; Liu et al., 2024).

Os efeitos adversos da acidificação manifestam-se por diferentes mecanismos interligados. Entre eles, destaca-se a diminuição da atividade microbiana do solo, que compromete os processos de decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, a disponibilização de nutrientes às plantas, resultando em menor peso individual do colmo (PIC) e prejuízos à produtividade total (Pang et al., 2025; Zhang et al., 2020).

Adicionalmente, a acidificação promove alterações no complexo de troca do solo, com redução da capacidade de troca catiônica e elevação das concentrações de íons potencialmente tóxicos, como Al, Fe e Mn, ao mesmo tempo em que restringe a absorção de Ca, Mg e P em razão de processos de fixação. Essas condições afetam negativamente o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, intensificando as limitações impostas à produção (Li et al., 2023; Rahman et al., 2018).

Estudos realizados em Latossolos Amarelos demonstram que diferentes sistemas de manejo podem influenciar significativamente os atributos químicos do solo. Campos et al. (2011), por exemplo, observaram que a adoção do sistema de plantio direto, especialmente após nove anos de implementação, resultou em aumento do pH do solo e em redução das concentrações de alumínio trocável (Al^{3+}), de $H+Al$ e da saturação por alumínio (m%), em comparação com o preparo convencional. Esses resultados indicam que o plantio direto pode contribuir para a melhoria da qualidade química do solo ao longo do tempo, reduzindo a acidez e potencializando a disponibilidade de nutrientes.

Além dos efeitos sobre o pH e a acidez, Campos et al. (2011) observaram que a adoção do plantio direto por períodos de cinco e nove anos promoveu aumentos significativos nos teores de Ca^{2+} e K^+ , bem como na soma de bases (SB), na capacidade de troca catiônica efetiva (t) e potencial (T), na saturação por bases (V%) e nos níveis de fósforo disponível, sobretudo na camada superficial do solo (0–0,20 m). Esses achados evidenciam que sistemas conservacionistas de manejo contribuem para a melhoria progressiva das propriedades químicas do solo, favorecendo o acúmulo de bases trocáveis e reduzindo a acidez ao longo do tempo.

A condutividade elétrica (CE) constitui um parâmetro amplamente utilizado para a avaliação da salinidade do solo, refletindo a concentração de sais solúveis presentes na solução do solo. Os valores de CE podem ser influenciados por diversos fatores, incluindo temperatura, teor de água, composição iônica, textura e estrutura do solo. O acúmulo excessivo de sais na camada superficial do solo caracteriza a salinidade, que pode ser decorrente de práticas de manejo inadequadas, como irrigação com água salina, presença de lençóis freáticos com elevada salinidade, aplicação de fertilizantes ricos em sais ou elevada taxa de evaporação da água do solo (Allen; Singh; Dalal, 2011).

A determinação da CE baseia-se na aplicação de uma corrente elétrica ao solo e na medição da resistência oferecida à passagem dessa corrente. Solos com maior concentração de sais apresentam condutividade elétrica mais elevada. A interpretação dos valores de CE deve considerar a tolerância específica de cada cultura à salinidade, uma vez que diferentes espécies vegetais apresentam respostas distintas a essas condições (Allen; Singh; Dalal, 2011).

A medição da condutividade elétrica do solo permite caracterizar propriedades que influenciam diretamente o desempenho das culturas e identificar a variabilidade espacial desses atributos dentro das áreas cultivadas (Corwin et al., 2003). Para tanto, o condutímetro representa um instrumento prático e eficiente, capaz de fornecer medições rápidas e confiáveis da CE do solo.

O incremento da concentração de sais solúveis no solo promove a redução do potencial osmótico da solução do solo, restringindo a absorção de água pelas plantas e, como consequência, comprometendo o crescimento e o funcionamento fisiológico vegetal. Adicionalmente, quando a salinidade está associada a elevados teores de sódio em formas trocáveis, intensificam-se os riscos de degradação das propriedades físicas do

solo, em função da maior suscetibilidade à dispersão de partículas argilosas e à redução da estabilidade dos agregados (Simões et al., 2021).

Em avaliações realizadas com a cultura da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de salinidade, Lira et al. (2018) constataram que o aumento da salinidade da água de irrigação resultou em diminuições da condutância estomática, da transpiração e da taxa fotossintética, além de promover redução linear do potencial hídrico das plantas.

Embora a cana-de-açúcar seja classificada como moderadamente sensível à salinidade, com valor limiar em torno de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$ (Ayers; Westcot, 1999; Maas; Hoffman, 1977), a literatura aponta variações entre cultivares. Estudos conduzidos por Plaut et al. (2000) e Meinzer et al. (1994) indicaram a existência de genótipos capazes de tolerar valores de salinidade próximos a 8 dS m^{-1} , enquanto Rozeff (1995) observou que determinadas cultivares podem sobreviver sob condições mais severas, entre 10 e 15 dS m^{-1} , ainda que com restrições ao crescimento.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) caracteriza a habilidade do solo de reter cátions e, conseqüentemente, de influenciar a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Essa capacidade está associada principalmente às cargas negativas presentes nas superfícies das partículas de argila e da matéria orgânica. Em solos ácidos, os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio podem apresentar cargas positivas, contribuindo para a CTC de saturação variável, dependente do pH do solo. Solos com baixa CTC apresentam maior propensão à lixiviação de cátions, especialmente em áreas descobertas ou sob regimes de precipitação intensa, resultando em perdas de nutrientes como cálcio, magnésio, potássio e sódio (Allen; Singh; Dalal, 2011).

No manejo do solo agrícola, a capacidade de troca catiônica (CTC) pode ser influenciada pela correção da acidez, geralmente realizada por meio da aplicação de calcário, que eleva o pH do solo e potencializa a disponibilidade de cargas negativas em solos ácidos. Esse processo aumenta a retenção de cátions essenciais, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} . A incorporação de matéria orgânica também contribui para a elevação da CTC, devido à adição de partículas com cargas negativas capazes de reter cátions, enquanto a aplicação de fertilizantes fornece diretamente os nutrientes necessários às plantas. Essas práticas de manejo são essenciais para manter um ambiente propício ao crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas (Cotrim et al., 2022).

A redução do teor de matéria orgânica, por sua vez, compromete a retenção de cátions e a disponibilidade de nutrientes, interferindo na atividade microbiana e em

processos essenciais à fertilidade do solo (Beutler et al., 2014). Solos com menor conteúdo de matéria orgânica apresentam menor capacidade de armazenamento de nutrientes e maior suscetibilidade à lixiviação, fatores que podem limitar o potencial produtivo das culturas. Embora observações de Beutler et al. (2014) tenham sido realizadas em espécies diferentes da cana-de-açúcar, os princípios permanecem aplicáveis, reforçando a importância da matéria orgânica na manutenção da CTC e na estabilidade química do solo.

A matéria orgânica do solo (MOS) participa de diversos processos que condicionam o funcionamento dos sistemas edáficos, atuando na dinâmica dos ciclos biogeoquímicos, em especial do fósforo e do enxofre. Além disso, constitui um compartimento relevante no armazenamento e na liberação de carbono e nitrogênio, bem como no fornecimento de substrato e habitat para a microbiota do solo. A MOS também exerce influência sobre propriedades físicas do solo, incluindo aspectos relacionados à organização estrutural. Do ponto de vista conceitual, a MOS consiste em um conjunto heterogêneo de compostos orgânicos em diferentes estágios de decomposição, oriundos de resíduos vegetais, animais e microbianos, além da biomassa microbiana viva que participa ativamente dos processos de transformação da matéria orgânica (Stevenson, 1994).

Os teores e a qualidade da MOS afetam diretamente os atributos físicos e biológicos do solo, contribuindo para a estabilidade dos agregados, a manutenção da diversidade biológica e o funcionamento dos processos associados à fertilidade. Por outro lado, a redução dos conteúdos de MOS está relacionada à desestruturação dos agregados, à diminuição da atividade biológica e à perda da capacidade produtiva do solo. A quantificação da MOS é comumente realizada por métodos baseados em reações de oxirredução, sendo amplamente utilizado o procedimento de Walkley-Black, que envolve a oxidação do carbono orgânico seguida de titulação (Cantarella; Quaggio; Raij, 2001).

As modificações nas propriedades do solo decorrentes da adoção de diferentes práticas de manejo, no que se refere à matéria orgânica, tendem a se manifestar apenas após períodos prolongados de aplicação contínua dessas práticas (Lisboa et al., 2012). A qualidade da matéria orgânica do solo e a dinâmica da comunidade microbiana associada são condicionadas por múltiplos fatores, entre os quais se destacam o tipo de cobertura vegetal, a espécie cultivada, suas características fisiológicas, a relação carbono/nitrogênio

dos resíduos aportados, bem como as condições ambientais, especialmente temperatura e umidade do solo (Oliveira et al., 2017).

Conforme proposto por Hazelton e Murphy (2007), a manutenção de teores mínimos de aproximadamente 2% de matéria orgânica no solo tem sido indicada como referência para a preservação de uma estrutura física adequada. Entretanto, a matéria orgânica desempenha diversas funções nos solos, cuja relevância e intensidade podem variar em função da classe textural, mineralogia e demais características intrínsecas de cada tipo de solo.

Embora a avaliação da matéria orgânica do solo seja limitada pela elevada variabilidade espacial e temporal das medições, bem como pela inexistência de valores críticos universalmente estabelecidos, esse atributo é amplamente empregado como parâmetro na análise da qualidade do solo, em função de sua relação com diversos processos e funções edáficas. Nesse contexto, a realização de monitoramentos sistemáticos ao longo do tempo é recomendada como estratégia para acompanhar os efeitos das práticas de manejo sobre os teores de matéria orgânica do solo (Macedo, 2018).

Entre os indicadores químicos empregados na avaliação da qualidade do solo, destacam-se a matéria orgânica e o potencial hidrogeniônico (pH), amplamente reconhecidos na literatura por sua associação com processos edáficos (Bunemann et al., 2018). A matéria orgânica do solo está relacionada à organização dos componentes biológicos, químicos e físicos, uma vez que constitui fonte de compostos orgânicos para a biota edáfica, participa dos processos de retenção e liberação de nutrientes e água e contribui para a formação e estabilidade dos agregados do solo (Vidal et al., 2021).

O pH do solo, por sua vez, condiciona a solubilidade e a disponibilidade de nutrientes, com destaque para o fósforo em ambientes tropicais e subtropicais, além de influenciar a atividade microbiana e a presença de alumínio em formas potencialmente tóxicas para plantas e organismos do solo (Cardoso et al., 2013).

Esses atributos químicos não atuam de forma isolada, podendo apresentar interações relevantes no sistema solo. Estudos têm evidenciado associações entre a emissão de dióxido de carbono e os teores de matéria orgânica, bem como correlações entre o pH do solo e a respiração basal, indicando a interdependência entre processos químicos e biológicos no ambiente edáfico (Moitinho et al., 2015; Lopes et al., 2021).

Em razão dos efeitos concomitantes da remoção do dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e da melhoria da qualidade do solo, o incremento do estoque de carbono (C) no solo representa uma estratégia relevante tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para o fortalecimento da segurança alimentar, contribuindo para o atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Nesse cenário, o carbono orgânico do solo (COS) destaca-se como um indicador fundamental na avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo, uma vez que reflete os impactos decorrentes de distintos fatores ambientais e práticas de manejo (Liu et al., 2024).

A intensidade do revolvimento do solo durante as operações agrícolas, associada à reduzida incorporação de resíduos vegetais, configura-se como um dos principais mecanismos responsáveis pela redução dos estoques de carbono orgânico do solo. Na cultura da cana-de-açúcar, a magnitude e a direção das alterações nos estoques de carbono apresentam elevada variabilidade, refletindo a diversidade dos sistemas de manejo empregados. Em sistemas de cultivo sem a queima da palhada, ocorre aporte de resíduos orgânicos à superfície do solo, o que pode favorecer o acúmulo de carbono orgânico ao longo do tempo, especialmente nas camadas superficiais (Borges, 2013).

Entretanto, a elevada relação carbono/nitrogênio (C/N) da palhada da cana-de-açúcar condiciona taxas mais lentas de decomposição e mineralização, o que pode restringir a incorporação efetiva desse carbono à matriz do solo e limitar incrementos expressivos nos estoques de carbono orgânico, sobretudo em curto e médio prazos (Borges, 2013).

Nesse contexto, o preparo convencional do solo (PC) pode promover a desagregação da estrutura do solo, favorecendo a exposição da matéria orgânica à decomposição e, conseqüentemente, intensificando as perdas de carbono orgânico do solo (COS) (Chappell et al., 2016). Em contraposição, sistemas conservacionistas, como o plantio direto (PD), têm sido amplamente discutidos como alternativas para a conservação do COS.

Contudo, os efeitos do PD sobre o sequestro de COS ainda são objeto de debate na literatura, sendo relatados impactos positivos, neutros ou até mesmo negativos (Powlson et al., 2014). Estudos indicam, por exemplo, que a adoção do PD não resulta necessariamente em maiores estoques de COS quando comparada ao preparo convencional (Sauvadet et al., 2018).

De modo geral, o consenso científico acerca da influência conjunta da fertilização e dos sistemas de preparo do solo sobre a dinâmica do COS permanece inconclusivo. Essas divergências têm sido atribuídas, em grande parte, à variabilidade das condições edafoclimáticas, incluindo fatores como clima, pH do solo, características locais e duração dos experimentos (Carvalhais et al., 2014; Challinor et al., 2014). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de aprofundar o entendimento dos mecanismos que regulam a dinâmica do carbono orgânico do solo, com ênfase nos fatores agronômicos e ambientais que controlam a formação e a estabilidade de suas diferentes frações.

A saturação por bases (V%) constitui um importante indicador químico na avaliação da fertilidade do solo, sendo calculada pela soma das bases trocáveis expressa como percentual da capacidade de troca de cátions (CTC) total do solo. Esse índice permite classificar a fertilidade natural do solo, considerando-se solos com V% superior a 50% como eutróficos, enquanto valores inferiores a 50% indicam solos distróficos, caracterizados por baixa fertilidade.

Em determinados ambientes, como os solos do domínio fitogeográfico Cerrado, observa-se elevada presença de alumínio trocável (Al^{3+}), com saturação por alumínio (m%) podendo atingir até 50%, classificando-os como solos álicos. Esse elevado teor de alumínio é um dos fatores que contribuem para a baixa fertilidade natural desses solos, limitando a disponibilidade de nutrientes essenciais e a produtividade agrícola (Leite, 2022).

2.4.3 Atributos microbiológicos

Os atributos microbiológicos do solo configuram-se como indicadores para a avaliação de sua qualidade e condição funcional, uma vez que apresentam elevada sensibilidade às práticas de manejo antrópico e às variações impostas por mudanças ambientais e climáticas. Tais atributos biológicos refletem alterações nos processos edáficos e podem ser interpretados de forma isolada ou em conjunto com indicadores químicos e físicos, permitindo uma análise integrada do estado do solo (Cotrim et al., 2022).

Todavia, a aplicação desses indicadores deve ser conduzida com rigor metodológico, sendo a seleção criteriosa daqueles mais adequados ao objetivo da

investigação. Conforme ressaltado por Martinez-Salgado et al. (2010), recomenda-se a utilização de indicadores microbiológicos que apresentem elevada sensibilidade às mudanças avaliadas e capacidade de discriminar os efeitos dos diferentes sistemas de manejo. Embora exista uma ampla gama de atributos biológicos passíveis de mensuração, a escolha daqueles mais representativos e consistentes é fundamental para assegurar interpretações robustas e cientificamente consistentes acerca da qualidade do solo.

Além de se considerar a capacidade dos atributos biológicos de refletirem alterações nos processos ecológicos do solo e sua aplicabilidade prática por pesquisadores, técnicos e produtores rurais, deve-se ressaltar que esses atributos, em geral, não dispõem de valores de referência universalmente estabelecidos ou de limites críticos bem definidos. Essa ausência de padronização dificulta a interpretação dos resultados e amplia a complexidade das análises, uma vez que a avaliação adequada requer a utilização de áreas de referência ou condições-controle que possibilitem a comparação entre os ambientes e sistemas de manejo investigados (Araújo; Monteiro, 2007).

Apesar das limitações associadas à ausência de valores de referência consolidados, a utilização de indicadores biológicos de qualidade do solo constitui uma ferramenta relevante para a avaliação dos processos ecológicos em áreas submetidas a distúrbios antrópicos ou em diferentes estágios de recuperação ambiental (Mendes; Sousa; Reis Junior, 2015). Esses indicadores possibilitam a análise do estado funcional do solo, contribuindo para a identificação de alterações decorrentes do manejo e para o acompanhamento da eficácia de práticas adotadas com vistas à conservação e à recuperação da qualidade edáfica (Oliveira Filho; Baretta; Santos, 2014).

Entre os diversos indicadores biológicos empregados na avaliação da qualidade do solo, destacam-se a diversidade microbiana e as funções e serviços ecossistêmicos por ela desempenhados. Os microrganismos apresentam elevada capacidade de resposta, adaptação e reorganização frente a condições de estresse e a alterações ambientais, o que os torna particularmente adequados como bioindicadores. Ademais, esses organismos participam de múltiplos processos ecológicos essenciais ao funcionamento do solo, como a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica, e possuem relativa facilidade de amostragem e análise, características que reforçam sua aplicabilidade em estudos de qualidade edáfica (Dantas et al., 2021).

Os microrganismos do solo apresentam atributos como elevada abundância e intensa atividade bioquímica e metabólica, o que lhes confere capacidade de responder de forma rápida e sensível às alterações nas condições ambientais. Entre os parâmetros microbiológicos comumente utilizados para sua avaliação destacam-se o carbono da biomassa microbiana, a respiração basal, os quocientes microbiano e metabólico, bem como a atividade enzimática. Esses indicadores fornecem informações consistentes acerca do estado funcional e da dinâmica da microbiota do solo, refletindo, de maneira integrada, as condições de qualidade e de funcionamento do sistema edáfico (Araújo; Monteiro, 2007).

A biomassa microbiana do solo é constituída, predominantemente, por comunidades de bactérias, fungos, protozoários e algas, as quais correspondem à fração viva da matéria orgânica do solo. A quantificação e a caracterização desse componente permitem inferir alterações nos processos edáficos, sendo particularmente sensíveis às mudanças promovidas pelas práticas de manejo, o que a torna um indicador apropriado para a avaliação da dinâmica e da qualidade do solo (Araújo et al., 2012).

A biomassa microbiana apresenta estreita relação com o funcionamento do solo, uma vez que integra a fração viva da matéria orgânica e participa ativamente dos processos edáficos. Entre suas atribuições, destaca-se o papel na ciclagem de nutrientes, atuando no controle da decomposição e do acúmulo da matéria orgânica, bem como nas transformações dos nutrientes em suas formas minerais disponíveis ou imobilizadas (Reis Junior, 2007). A estimativa da biomassa microbiana é realizada, de modo geral, por meio da determinação do carbono da biomassa microbiana, parâmetro que permite inferir o tamanho e o nível de atividade das comunidades microbianas do solo, constituindo um indicador do estado funcional e da dinâmica do sistema biológico edáfico.

De forma complementar, o carbono da biomassa microbiana (CBM) corresponde à fração de carbono incorporada às células dos microrganismos presentes no solo. Valores mais elevados de CBM estão associados a maior abundância de microrganismos metabolicamente ativos, bem como a maior potencial de decomposição da matéria orgânica e intensificação dos processos biológicos. Dessa maneira, o CBM reflete o nível de atividade biológica do solo e pode ser utilizado como um indicador do seu estado funcional e da dinâmica dos processos edáficos (Insam; Domsch, 1988).

Outro atributo microbiológico amplamente utilizado é a respiração basal do solo, a qual corresponde à soma das atividades metabólicas dos microrganismos que resultam

na liberação de dióxido de carbono (CO₂). Essa emissão decorre, predominantemente, da atuação de bactérias e fungos durante os processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica, refletindo o nível de atividade metabólica da microbiota do solo e a intensidade dos processos biogeoquímicos em curso (Silva; Azevedo; De-Polli, 2007).

A respiração basal do solo expressa a taxa de liberação de dióxido de carbono (CO₂) decorrente da atividade metabólica dos microrganismos durante os processos de decomposição da matéria orgânica. Valores mais elevados de emissão de CO₂ indicam maior intensidade do metabolismo microbiano e, conseqüentemente, maior atividade biológica no ambiente edáfico, o que confere a esse atributo caráter indicativo do funcionamento biológico do solo (Silva et al., 2013).

Santos et al. (2004), ao compararem sistemas de plantio direto e preparo convencional, observaram maiores taxas de respiração basal no plantio direto, associando esse resultado aos maiores teores de carbono orgânico total acumulados nesse sistema de manejo. Evidências convergentes foram reportadas por Balota et al. (1997), Sall et al. (2006) e Meriles et al. (2009), que também constataram maior atividade respiratória da microbiota em sistemas de manejo que minimizam o revolvimento do solo, indicando condições mais favoráveis ao funcionamento biológico e à manutenção do carbono orgânico no ambiente edáfico.

Todavia, a interpretação dos valores de respiração basal deve ser conduzida com cautela, uma vez que taxas elevadas de liberação de CO₂ nem sempre refletem maior produtividade ou melhor condição do solo. Em determinadas situações, uma respiração basal acentuada pode indicar a ocorrência de distúrbios no sistema edáfico, favorecendo a mineralização acelerada da matéria orgânica e a conseqüente perda de carbono orgânico para a atmosfera, com possíveis efeitos negativos sobre sua disponibilidade às plantas ao longo do tempo (Islam; Weil, 2000).

Em contrapartida, Lourent et al. (2011) relataram valores mais elevados de respiração basal em áreas de vegetação nativa quando comparadas a sistemas agrícolas, atribuindo esse comportamento aos maiores teores de carbono da biomassa microbiana nesses ambientes. Dessa forma, a análise da respiração basal deve ser realizada de maneira integrada a outros indicadores biológicos e químicos do solo, de modo a evitar interpretações isoladas e conclusões potencialmente imprecisas acerca da qualidade e do funcionamento do sistema edáfico.

O quociente metabólico (qCO_2) é determinado pela razão entre a respiração basal do solo e o carbono da biomassa microbiana, sendo expresso como a quantidade de dióxido de carbono liberada por unidade de tempo em relação à biomassa microbiana existente. Esse indicador reflete a eficiência metabólica da microbiota do solo, de modo que valores elevados de qCO_2 indicam maior gasto energético para a manutenção das células microbianas, frequentemente associado a condições de estresse ou a ambientes edáficos submetidos a perturbações (Alves et al., 2011).

Nesse sentido, o qCO_2 constitui um parâmetro relevante para a avaliação da atividade microbiana e do estado fisiológico das comunidades microbianas do solo. Valores mais altos desse quociente podem sinalizar aumento na demanda energética dos microrganismos, sugerindo alterações desfavoráveis nas condições ambientais ou no manejo do solo, enquanto valores mais baixos tendem a indicar maior eficiência no uso do carbono e maior estabilidade do sistema biológico edáfico (Alves et al., 2011).

O quociente microbiano ($qMic$) corresponde à razão entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total do solo, sendo utilizado como indicador da qualidade da matéria orgânica. Esse parâmetro expressa a proporção do carbono orgânico que se encontra temporariamente imobilizada na biomassa microbiana, refletindo a eficiência das comunidades microbianas na assimilação e utilização dos compostos orgânicos disponíveis (Silva et al., 2010).

Adicionalmente, o $qMic$ fornece subsídios para a avaliação da capacidade de armazenamento e da dinâmica do carbono no sistema edáfico. Valores reduzidos desse indicador têm sido associados a ambientes degradados, nos quais se observam menores estoques de carbono orgânico e diminuição da atividade biológica, evidenciando comprometimento do funcionamento do solo (Carneiro et al., 2009).

Conforme relatado por Jakelaitis et al. (2008), o quociente microbiano ($qMic$) geralmente apresenta variações na faixa de 1% a 4%, sendo que valores inferiores a 1% indicam a ocorrência de fatores restritivos à atividade microbiana no solo. Esse comportamento sugere limitações associadas à disponibilidade de substrato orgânico ou a condições ambientais desfavoráveis ao desenvolvimento da microbiota edáfica.

Adicionalmente, Jenkinson e Ladd (1981) indicam que, em solos cultivados, o valor de equilíbrio do $qMic$ situa-se em torno de 2,2%, representando uma condição de estabilidade na relação entre o carbono orgânico total e o carbono da biomassa microbiana. Esse valor tem sido amplamente utilizado como referência para a

interpretação da dinâmica do carbono e da eficiência biológica em sistemas agrícolas. Os microrganismos do solo participam ativamente dos processos de disponibilização de fósforo (P), atuando tanto por vias diretas, associadas à solubilização de formas pouco disponíveis, quanto por vias indiretas, relacionadas à mineralização de compostos orgânicos contendo esse nutriente (Sharma et al., 2013; Nannipieri et al., 2011).

Bactérias e fungos apresentam a capacidade de promover a solubilização do P por diferentes mecanismos, entre os quais se destaca a liberação de ácidos orgânicos, como os ácidos glucônico, málico e oxálico. Esses compostos podem complexar íons Al^{3+} associados a fosfatos de baixa solubilidade, como o fosfato de alumínio ($AlPO_4$), favorecendo a liberação do íon fosfato (PO_4^{3-}) na solução do solo (Sharma et al., 2013).

A mineralização do fósforo orgânico ocorre predominantemente por meio da ação de enzimas microbianas conhecidas como fosfatases, embora as plantas também sejam capazes de sintetizar e exsudar determinadas formas dessas enzimas (Nannipieri et al., 2011).

As fosfatases constituem um grupo enzimático responsável pela hidrólise de ésteres e anidridos do ácido fosfórico (H_3PO_4). A fosfatase ácida pode ser produzida tanto por microrganismos quanto por plantas, enquanto a fosfatase alcalina apresenta, majoritariamente, origem microbiana (Nannipieri et al., 2011).

Avanços obtidos a partir de abordagens independentes de cultivo têm permitido elucidar, em nível celular, os mecanismos regulatórios envolvidos na síntese de enzimas associadas à mineralização do fósforo (Santos-Beneit, 2015). De modo geral, a expressão dessas enzimas ocorre em resposta à limitação de P no ambiente, sendo os genes responsáveis por sua codificação integrantes do denominado Pho Regulon (Santos-Beneit, 2015). No caso da fosfatase ácida, o gene *phoC* tem sido frequentemente descrito como um dos principais envolvidos na codificação dessa enzima (Fraser et al., 2017).

Em consonância com os mecanismos microbiológicos e enzimáticos descritos anteriormente, o sistema de manejo do solo exerce influência direta sobre a distribuição e a intensidade da atividade microbiana e enzimática no perfil edáfico. Segundo Dick (1984), áreas conduzidas sob plantio direto tendem a apresentar maior atividade microbiana nas camadas superficiais do solo, em função do acúmulo de resíduos vegetais na superfície, enquanto no preparo convencional o revolvimento promove a incorporação desses resíduos ao perfil, resultando em sua diluição espacial e em menor estímulo à biota do solo.

Nesse contexto, Lisboa et al. (2012) relataram maior atividade da fosfatase ácida em sistemas de plantio direto, resultado que corrobora observações realizadas por Roldán et al. (2005) em áreas cultivadas com milho e feijão. Esses autores atribuíram o incremento da atividade enzimática não apenas ao maior aporte e à acumulação de carbono orgânico característicos de sistemas conservacionistas, mas também ao estímulo à atividade de fungos micorrízicos arbusculares, organismos sensíveis ao revolvimento do solo e favorecidos pela manutenção da estrutura edáfica.

Evidências adicionais foram apresentadas por Mina et al. (2008), que constataram valores superiores de atividade de fosfatase em áreas manejadas sob plantio direto quando comparadas àquelas submetidas ao preparo convencional, reforçando a relação entre práticas conservacionistas, dinâmica microbiana e processos de mineralização do fósforo no solo.

Em continuidade à discussão sobre a influência do manejo do solo na atividade microbiana e enzimática, destaca-se que o aporte de material orgânico constitui um dos principais fatores moduladores dos processos bioquímicos no solo. A incorporação de resíduos orgânicos afeta diretamente a atividade do complexo enzimático da celulase, composto pelas enzimas endoglucanase, exoglucanase e β -glicosidase, responsáveis pela degradação da celulose presente nos resíduos vegetais. Entre essas enzimas, a β -glicosidase tem sido muito utilizada em estudos de ecologia microbiana, por atuar na etapa final da hidrólise da celobiose, convertendo esse dissacarídeo em duas moléculas de glicose disponíveis para o metabolismo microbiano (Ahmed et al., 2017).

Em consonância com a relação entre o aporte de resíduos orgânicos e a intensificação da atividade enzimática do solo, evidenciada para as enzimas do complexo celulolítico, estudos têm demonstrado que a β -glicosidase apresenta elevada sensibilidade às práticas de manejo. Lisboa et al. (2012), ao avaliarem atributos microbiológicos como indicadores de qualidade do solo sob distintos sistemas de preparo, constataram diferenças consistentes entre áreas com e sem revolvimento.

Em todas as épocas de amostragem, os maiores valores de atividade da β -glicosidase foram registrados no sistema de plantio direto, com médias de 122,7 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, enquanto o preparo convencional apresentou valores substancialmente inferiores, da ordem de 63,18 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, evidenciando quase o dobro de atividade enzimática na ausência de mobilização do solo.

Resultados convergentes foram relatados por Roldán et al. (2005) em sistemas de produção de sorgo no México, nos quais a atividade da β -glicosidase foi mais elevada sob plantio direto, particularmente na camada superficial do solo (0–5 cm). Os autores observaram ainda que, enquanto nesse sistema a atividade enzimática tende a decrescer com a profundidade, no preparo convencional os valores se distribuem de forma mais homogênea ao longo do perfil, em decorrência da incorporação dos resíduos.

De modo semelhante, van den Bossche et al. (2008) verificaram que a atividade da β -glicosidase em sistemas de plantio direto e preparo reduzido foi aproximadamente duas vezes superior àquela observada sob preparo convencional. Essa resposta tem sido atribuída à maior capacidade dos sistemas conservacionistas de promover o acúmulo e a proteção do carbono orgânico nas camadas superficiais do solo, interpretação igualmente sustentada pelos achados de Melero et al. (2008).

Em continuidade à discussão sobre enzimas do solo sensíveis às práticas de manejo, destaca-se a arilsulfatase, cuja atividade está associada aos processos de ciclagem do enxofre no ambiente edáfico. Essa enzima catalisa a hidrólise de diferentes ésteres sulfatos aromáticos, incluindo p-nitrofenil sulfato, sulfato de fenila de potássio, sulfato de nitrocatecol de potássio, fenolftaleína sulfato e sulfato de potássio, sendo o p-nitrofenil sulfato um dos substratos mais empregados em ensaios laboratoriais. A atividade enzimática determinada a partir desse substrato apresenta variação em função do tipo de solo, refletindo diferenças nas características físico-químicas e na composição da matéria orgânica (Tabatabai; Bremner, 1970).

De modo geral, a atividade da arilsulfatase tende a decrescer com o aumento da profundidade do solo, comportamento frequentemente associado à redução do aporte de resíduos orgânicos e da atividade microbiana nas camadas subsuperficiais. Estudos clássicos evidenciaram correlações significativas entre a atividade dessa enzima e os teores de carbono orgânico, nitrogênio total e a capacidade de troca catiônica, indicando sua relação com a qualidade da matéria orgânica e com a fertilidade química do solo (Tabatabai; Bremner, 1970).

Considerando que a maior fração do enxofre total nos solos encontra-se sob a forma de compostos orgânicos, a arilsulfatase participa dos processos de transformação desse elemento, contribuindo para sua disponibilização às plantas por meio da mineralização. Entretanto, a relação entre a atividade da arilsulfatase e a efetiva liberação de enxofre mineral nem sempre é direta, uma vez que Jarvis et al. (1987) não observaram

correlação consistente entre a atividade dessa enzima e as taxas de mineralização do enxofre. Esses resultados indicam que, embora a arilsulfatase seja um indicador relevante da dinâmica do enxofre orgânico no solo, sua interpretação deve considerar, de forma integrada, outros atributos biológicos, químicos e ambientais que regulam a ciclagem desse nutriente.

Lisboa et al. (2012) observaram que a atividade da arilsulfatase varia de maneira sistemática em resposta aos diferentes sistemas de preparo do solo, sendo mais elevada nos manejos caracterizados pela ausência de revolvimento. Na comparação entre o preparo convencional e sistemas conservacionistas, como o cultivo mínimo e o plantio direto, os autores verificaram que os tratamentos sem mobilização do solo apresentaram, de forma recorrente, as maiores taxas de atividade enzimática ao longo dos períodos avaliados.

Evidências semelhantes foram apresentadas por Melero et al. (2008), que relataram maior atividade da arilsulfatase em áreas conduzidas sob plantio direto em relação ao preparo convencional, atribuindo esse padrão ao maior acúmulo de carbono orgânico favorecido por práticas de manejo menos disruptivas à estrutura do solo.

Embora a importância dos microrganismos na mediação de processos ecossistêmicos seja reconhecida, ainda há muito a ser descoberto sobre as relações entre a diversidade microbiana e as funções dos ecossistemas. A pesquisa contínua nessa área é essencial para melhorar nossa compreensão e promover práticas de manejo sustentáveis que promovam a saúde e a qualidade do solo (Laureto; Cianciaruso; Samia, 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, localizada no município de Frutal – MG, coordenadas 20°06'28 de latitude Sul e 48°53'21" de longitude Oeste e com altitude média de 516 m (Figura 1). O clima predominante da região, segundo classificação de Koppen, é do tipo subtropical (Aw), com estações bem definidas, chuvosa no verão e seca no inverno (Alvares et al., 2013).

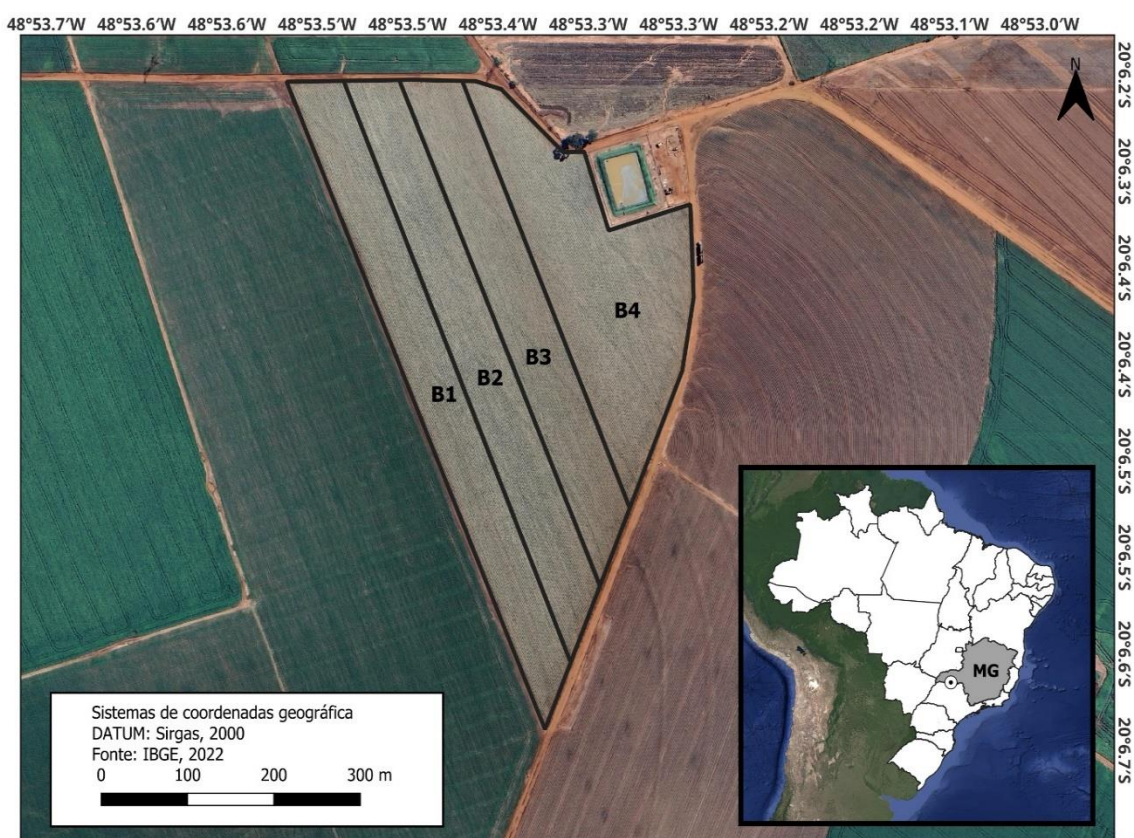


Figura 1. Localização e delimitação da área experimental no estado de Minas Gerais (MG), no município de Frutal, na Fazenda Três Irmãos.

As condições meteorológicas (temperatura mensal, precipitação pluviométrica e umidade relativa) foram monitoradas ao longo do período de condução do experimento (Figura 2). Na região, a média anual de precipitação é de 1.429 mm, acompanhada por temperatura e umidade relativa do ar com médias anuais de 23,9°C e 54%, respectivamente.

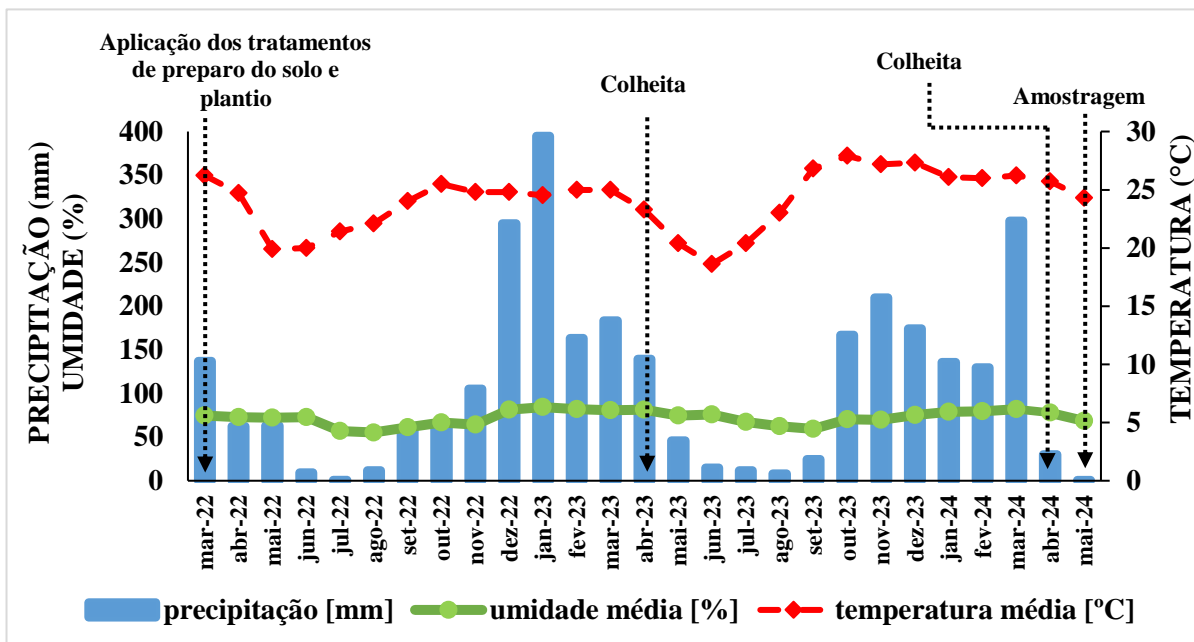


Figura 2. Dados meteorológicos mensais (temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), precipitação pluviométrica (mm) e cronograma das etapas experimentais durante os anos de 2022, 2023 e 2024, no município de Frutal, Minas Gerais. Fonte: Estação Bunge Frutal (2024).

O solo da área do estudo foi caracterizado como Latossolo Vermelho Distrófico conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), com base em mapas pedológicos do estado de Minas Gerais (IDE-SISEMA, 2018). Quanto à classe textural, o solo foi caracterizado como franco argilo-arenoso, com base na análise granulométrica. Os teores de argila foram de 235,5; 251,5 e 253,2 g kg⁻¹, os de silte 30,5; 31,2 e 26,5 g kg⁻¹ e os de areia total 734,0; 717,2 e 720,2 g kg⁻¹, nas camadas de 0,00–0,15; 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m, respectivamente. A densidade de partículas foi de 2,69; 2,68 e 2,67 kg dm⁻³ nessas mesmas profundidades.

Antes da implementação do experimento, no período entre 2013 e 2018, área foi cultivada com cana-de-açúcar. Na safra 2018/19, ocorreu uma intervenção que consistiu na eliminação das soqueiras e subsolagem em área total com profundidades variando entre 0,40 e 0,45 m.

Após essa intervenção, houve transição para um novo sistema de cultivo, pautado na sucessão de culturas de grãos em sistema plantio direto, com plantio de soja na safra principal e do milho e sorgo nas safras secundárias nos anos subsequentes até 2021 (Tabela 1).

Tabela 1. Dados cronológicos do histórico da área experimental nos anos de 2013 a 2022.

ANO	SAFRA	SAFRINHA	PRODUTIVIDADE	
			Safra	Safrinha
2013	Cana-de-açúcar	X	120.000 kg ha ⁻¹	X
2014	Cana-de-açúcar	X	100.000 kg ha ⁻¹	X
2015	Cana-de-açúcar	X	100.000 kg ha ⁻¹	X
2016	Cana-de-açúcar	X	90.000 kg ha ⁻¹	X
2017	Cana-de-açúcar	X	85.000 kg ha ⁻¹	X
2018	Cana-de-açúcar	X	70.000 kg ha ⁻¹	X
2018/19	Soja	Sorgo	4.500 kg ha ⁻¹	3.900 kg ha ⁻¹
2019/20	Soja	Milho	3.960 kg ha ⁻¹	4.800 kg ha ⁻¹
2020/21	Soja	Milho	3.840 kg ha ⁻¹	1.200 kg ha ⁻¹
2021/22	Soja	X	4.000 kg ha ⁻¹	X
2022/23	Cana-de-açúcar	X	Plantio	X

Fonte: Dados fornecidos pelo produtor.

Antes do início do experimento, realizou-se a análise dos parâmetros de fertilidade do solo da área experimental, seguindo a metodologia descrita por Raij et al. (2001). Os resultados dos atributos químicos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de fertilidade do solo na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, Frutal-MG, antes da instalação do canavial em 2022.

0 - 20 cm															
pH	P	K	Ca	Mg	Al	Al+H	SB	V	Sat. A	Cu	Fe	Mn	Zn	CTC Efetiva	CTC pH 7
	mg dm ³		mmol/dm ³					%		mg/ dm ³				mmol/dm ³	
5,6	14,90	2,48	27,83	6,03	0,50	18,00	36,33	66,87	1,36	3,90	20,70	3,11	2,30	36,83	54,33
20 - 40cm															
pH	P	K	Ca	Mg	Al	Al+H	SB	V	Sat. Al	Cu	Fe	Mn	Zn	CTC efetiva	CTC pH 7
	mg dm ³		mmol/dm ³					%		mg/ dm ³				mmol/dm ³	
5,7	13,63	2,30	25,96	6,24	0,00	20,00	34,49	63,30	---	4,00	21,00	3,38	4,50	34,49	54,49

* pH em Cloreto de Cálcio 0,01 mol L⁻¹; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; H+Al: acidez potencial; SB: soma das bases; V: saturação por bases; Sat. Al: saturação por alumínio; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; CTC efetiva: capacidade total de troca de cátions do solo no seu pH natural, sem incluir o íon hidrogênio (H⁺); CTC pH 7: quantidade de cátions em pH 7,0.

Embora análise tenha indicado uma baixa necessidade de calagem (0,38 t/ha de calcário dolomítico), segundo as recomendações de Quaggio et al. (2022), foi implementada uma aplicação de 2 t/ha de calcário. Essa operação foi selecionada por

tratar-se de uma cultura semi-perene e o intervalo previsto para a próxima calagem só ocorreria em 5 a 6 anos, dependendo da produtividade.

O calcário foi incorporado ao solo durante as operações de preparo do solo; exceto no sistema de plantio direto. Posteriormente, efetuou-se a adubação da cultura, seguindo as recomendações propostas por Quaggio et al. (2022).

3.2 Delineamento experimental

O experimento foi realizado em delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 5x3, composto por cinco sistemas de preparos do solo e três profundidades de avaliação (0,00 – 0,15; 0,15 – 0,30; 0,30 – 0,45 m), com quatro repetições (blocos).

Os sistemas de preparo para o plantio de cana-de-açúcar foram definidos como: PD – plantio sobre a palhada da cultura antecessora (soja); GI+GN – uso de grade intermediária de arrasto (0,20 a 0,25 m), seguida de grade niveladora (0,10 a 0,15 m); AA+GN – uso de arado de aiveca (0,40 a 0,45 m), seguido de grade niveladora (0,10 a 0,15 m); SA+GN – uso de subsolador de arrasto (0,40 a 0,45 m), seguido de grade niveladora (0,10 a 0,15 m) e GN – uso exclusivo de grade niveladora (0,10 a 0,15 m), sendo que as profundidades indicadas referem-se à profundidade de atuação de cada implemento.

As parcelas foram estabelecidas com dimensões de 12 metros de largura por 50 metros de comprimento (600 m²), com plantio em espaçamento de 1,5 m, utilizando a variedade de cana-de-açúcar RB966928.

3.3 Condução experimental e manejo da cultura

Em 15 de março de 2022, a área foi submetida aos preparos do solo de acordo com cada tratamento: plantio sob a palhada da cultura antecessora soja (PD); grade intermediária + grade niveladora (GI+GN); arado de aiveca hidráulico + grade niveladora (AA+GN); subsolador de arrasto + grade niveladora (SA+GN); e grade niveladora (GN).

No plantio sob a palhada da soja (cultura antecessora), denominado plantio direto (PD), foi realizada a aplicação de 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico em cobertura na área

total, um dia antes do plantio, sem o revolvimento do solo e a abertura do sulco para o plantio (0,30 m).

Nos preparos com grade intermediária + grade niveladora (GI+GN), arado de aiveca + grade niveladora (AA+GN), subsolador de arrasto + grade niveladora (SA+GN) e grade niveladora (GN) as 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico aplicadas em área total foram incorporadas com os respectivos implementos agrícolas de cada tratamento.

O preparo do solo foi executado com os seguintes implementos: subsolador de arrasto, constituído de 11 hastes do tipo reta inclinada, atuando em uma profundidade de 0,40 a 0,45 m, grade intermediária de arrasto composta com 24 discos com diâmetro de 28", operando em profundidade 0,20 a 0,25 m, arado de aiveca hidráulico com 4 hastes, trabalhando em uma profundidade de 0,40 a 0,45 m e grade niveladora com 68 discos de 22" de diâmetro, com profundidade de operação de 0,10 a 0,15 m.

Para as etapas de preparo e sulcação, utilizou-se o trator 4x4 John Deere, modelo 7200J, com potência de 147,1 kW (200cv) no motor, operando a 2200 rpm na 3ª marcha reduzida, equipado com pneus dianteiros Michelin 600/65 R28 traseiros Michelin 710/70 R38, e com massa de 11400 kg. A profundidade de sulcação foi de 0,30 m.

A cultivar de cana-de-açúcar RB 966928 foi plantada manualmente, com densidade de 15 gemas por metro linear, em espaçamento simples (1,5 m). A adubação de plantio seguiu as recomendações de Quaggio et al. (2022), com aplicação de 600 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 05-25-25 (N-P-K) nos sulcos de plantio a partir da análise de solo realizada antes da instalação do experimento.

Em maio de 2022, efetuou-se a operação de quebra-lombo, utilizando-se o trator 4x4 John Deere, modelo 6180J, com potência de 132,39 kW (180 cv), girando a 2200 rpm na 3ª marcha reduzida, com pneus dianteiros Michelin 420/85 R28 e traseiros Michelin 650/75 R32, e uma massa de 10350 kg; simultaneamente, efetuou-se a adubação pós-plantio com aplicação de 200 kg ha⁻¹ da formulação 00-00-60 de NPK.

Em abril de 2023, foi realizada a colheita da cana- planta. Subsequentemente, foi aplicada a adubação de cobertura, utilizando-se 700 kg ha⁻¹ do fertilizante mineral NPK 20-05-20. Este procedimento foi repetido em abril de 2024, após a colheita da cana-soca (segundo corte).

Paralelamente ao manejo da adubação, adotou-se o controle fitossanitário da cultura. A aplicação de defensivos agrícolas (herbicidas e inseticidas) foi realizada em três épocas distintas: após a operação de quebra-lombo e, após a colheita do primeiro e

segundo corte. O manejo de plantas invasoras foi efetuado com a aplicação dos herbicidas Alion ($0,100 \text{ L ha}^{-1}$) e Fortaleza (2 L ha^{-1}). Para o controle de pragas, foram aplicados os inseticidas Altacor ($0,060 \text{ kg ha}^{-1}$), para o controle da broca-da-cana, e Diamante (1 L ha^{-1}), para o controle da cigarrinha-das-raízes. Neste manejo fitossanitário houve o emprego do pulverizador 4730 John Deere, munido de pneus Michelin SprayBIB VF 420/93 R50, barra de 30 m e massa de 11.650 kg.

Adicionalmente ao manejo nutricional e fitossanitário, realizou-se a aplicação de vinhaça na área experimental, com lâmina equivalente a 30 mm. A primeira aplicação foi realizada 30 dias após a colheita da cana-planta, e a segunda, 20 dias após a colheita da primeira cana-soca. A coleta das amostras de solo, tanto deformadas quanto indeformadas, foi efetuada em período inferior a sete dias após essa reaplicação.

3.4 Avaliação dos parâmetros de qualidade do solo

Como parâmetros de qualidade do solo foram selecionados atributos físicos, químicos e biológicos. Esses foram mensurados após a colheita da cana-soca (segundo corte) em amostras de solo deformadas e indeformadas coletadas no centro da entrelinha da cultura da cana-de-açúcar (Figura 3), no período de 4 a 5 de maio de 2024.

A determinação da densidade, porosidade, condutividade hidráulica, resistência à penetração e retenção de água do solo foi realizada em amostras indeformadas de solo, coletadas em anéis volumétricos ($0,055 \text{ m}$ de diâmetro e $0,041 \text{ m}$ de altura), conforme descrito por Camargo et al. (2009).

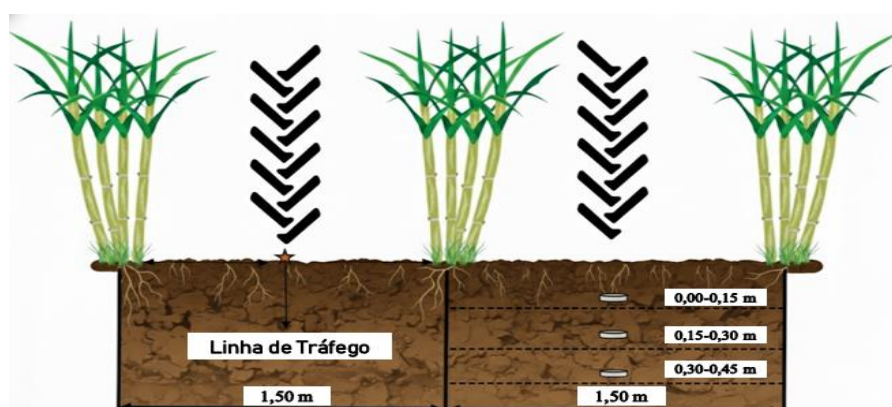


Figura 3. Diagrama esquemático do espaçamento entrelinhas, da linha de tráfego de máquinas agrícolas e das profundidades de amostragem do solo (0,00–0,15; 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m) na cultura da cana-de-açúcar.

Para esta coleta, foram selecionados dois pontos em cada parcela experimental. Os anéis volumétricos foram posicionados aproximadamente nas profundidades de 0,075 m, 0,225 m e 0,375 m, representando as camadas de 0,0-0,15 m, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m, respectivamente.

Desta forma, após as operações de colheita de cana-de-açúcar, foram coletadas 120 amostras em anéis volumétricos (5 tratamentos \times 3 profundidades \times 4 blocos \times 2 repetições de campo), as quais foram acondicionadas em filmes plásticos, previamente parafinados, para preservação até as análises.

Para a determinação dos atributos biológicos, dos parâmetros de fertilidade, da dispersão de argila em água, do índice de floculação, da densidade de partículas, da análise granulométrica e da estabilidade de agregados, foram realizadas análises em amostras deformadas (estrutura do solo não preservada). Em cada parcela, foram coletadas aleatoriamente amostras simples em cinco pontos, utilizando um trado holandês, em três camadas: 0,0-0,15 m, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m, compondo-se posteriormente uma amostra composta para cada profundidade de cada parcela experimental, totalizando-se em 60 amostras deformadas (5 preparos \times 4 repetições \times 3 profundidades).

Cada amostra composta foi embalada em recipiente apropriado e ambas as amostras, deformada e indeformada, foram enviadas para o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para análise dos atributos físicos, químicos e microbiológicos.

3.4.1 Atributos Físicos

3.4.1.1 Granulometria

No procedimento descrito no manual de métodos e análises de solo (Teixeira et al., 2017), as amostras de solo foram submetidas à desagregação e posterior passagem por uma peneira de malha com 2 mm de diâmetro, resultando na obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). O método da pipeta, foi utilizado para determinar as proporções de argila, silte e areia na amostra de solo, caracterizando a distribuição granulométrica primária.

3.4.1.2 Argila dispersa em água e Índice de floculação

O método da pipeta foi utilizado para determinar a quantidade de argila dispersa em água (ADA). A amostra foi dispersa em água e a fração de argila foi separada da fração de silte por sedimentação, desta forma, a argila foi quantificada por pesagem após secagem em estufa. O índice de floculação foi determinado pela razão entre a argila naturalmente dispersa e a argila total (após dispersão), indicando a proporção da fração argila que se encontra floculada (agregada), remetendo-se sobre o grau de estabilidade dos agregados (Donagemma e Viana, 2017).

3.4.1.3 Densidade do Solo e Porosidade do solo

A densidade do solo, conforme preconizado por Almeida et al. (2017b), foi obtida para cada amostra por meio do método do anel volumétrico e calculado conforme a equação:

$$D_s = M_{ss} / V_t$$

Onde:

- D_s representa a densidade do solo (g cm^{-3});
- M_{ss} denota a massa contida no anel volumétrico e seca a 105°C (g);
- V_t corresponde ao volume total do solo, considerando o volume do anel volumétrico (cm^3).

A porosidade total foi obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105°C durante 48 h. A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão (6 kPa); e pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade (Almeida et al., 2017a).

3.4.1.4 Retenção de água no solo

Para a construção da Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS), foram efetuados ensaios com o objetivo de determinar o teor de água e o potencial de referência em que está retida no solo. Os métodos convencionais para fornecer esses dados em laboratório visam equilibrar o teor de água entre as amostras em relação a uma série de

pontos de potencial mátrico predefinidos, os quais são equilibrados por meio de tensão ou pressão.

Neste estudo, foi utilizada a mesa de tensão (De Oliveira, 1968) para equilibrar as amostras nos potenciais de 0, 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa, e a câmara de Richards (Richards, 1965) para os potenciais de 30, 70, 100, 500 e 1.500. Cada ponto da curva foi obtido com quatro repetições por tratamento e duas repetições de campo, em três camadas de solo (0,00-0,15, 0,15-0,30 cm e, 0,30-0,45 m), totalizando-se em 120 amostras indeformadas (anéis de 100 cm³), conforme o método descrito por Teixeira e Bhering (2017).

3.4.1.5 Condutividade hidráulica

Para essa análise, as amostras de solo foram coletadas preservando integralmente sua estrutura, por meio de cilindros metálicos em três diferentes profundidades, a saber: 0,00 a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m. Posteriormente, as amostras foram dispostas em bandejas para a saturação do solo.

Decorrido o período de 24 horas desde o início da saturação, iniciou-se a análise. Para a obtenção dos valores da condutividade hidráulica do solo, adotou-se uma adaptação da técnica de Teixeira, Viana e Donagemma (2017), em manter uma determinada carga hidráulica (h), registrando o volume de água percolada nesse intervalo. A partir da vazão e das dimensões da amostra (comprimento - L e área da seção transversal - A), foi possível calcular a condutividade hidráulica do solo saturado utilizando a equação:

$$K = \left(\frac{Q \times L}{A \times H \times t} \right)$$

Onde:

K – condutividade hidráulica, em cm h⁻¹.

Q – volume do percolado, em mL, ou seja, o valor da última leitura quando não há variação entre os valores anteriores, ou a média das duas leituras quando há alguma variação.

L – altura do bloco do solo, em cm.

H – altura do bloco do solo e da coluna de água, em cm.

A – área do cilindro, em cm².

t – tempo de percolação, em horas (Obs: transforma minutos em horas).

3.4.1.6 Estabilidade de Agregado

Para avaliar a estabilidade dos agregados do solo, cinco amostras simples foram coletadas para formar uma amostra composta. Após a desagregação dos torrões e a peneiragem em diferentes malhas, os agregados retidos na peneira de 4 mm foram selecionados para a análise laboratorial úmida, de acordo com os procedimentos de Salton et al. (2017).

3.4.1.7 Resistência do solo à penetração em laboratório

Em laboratório, a resistência do solo à penetração foi determinada em amostras indeformadas em anéis volumétricos. Para eliminar o efeito da variação do teor de água, as amostras foram saturadas por capilaridade e submetidas a tensão de 10 kPa para equilibrar a umidade. A determinação da resistência foi realizada com penetrômetro de bancada equipado com um dinamômetro eletrônico (modelo FGV-50XY, marca Shimpo). Foi utilizada uma haste metálica com cone de 0,004 m de diâmetro basal e ângulo de 60°, sendo aplicada uma velocidade constante de penetração de 1,55 mm s⁻¹ (FIGUEIREDO et al., 2011).

Para minimizar os efeitos de bordadura, foram desconsideradas as leituras obtidas nas extremidades do anel, adotando-se um procedimento padronizado para todas as amostras. Em cada anel, foram realizadas entre 280 e 296 leituras ao longo de sua extensão; entretanto, as 20 primeiras leituras da borda superior foram descartadas. Assim, a média aritmética foi calculada a partir das leituras compreendidas entre L20 e L240, totalizando aproximadamente 220 valores por anel.

Os resultados foram inicialmente obtidos em kgf e, em seguida, convertidos para MPa para padronização das unidades.

3.4.2 Atributos Químicos

3.4.2.1 Parâmetros de fertilidade do solo

As amostras coletadas foram enviadas ao Laboratório de Química do Solo para a realização das análises. No laboratório, as amostras foram desagregadas, secas ao ar e

peneiradas em malha de abertura de 2,00 mm. Foram realizadas determinações de matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio (pH), teores de fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), acidez potencial (H⁺+Al³⁺), valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e condutividade elétrica (CE) de acordo com metodologia proposta por Raij et al. (2001).

3.4.2.2 Carbono Orgânico Total (COT)

O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado por oxidação ácida do dicromato, de acordo com metodologia proposta por Raij et al. (2001).

3.4.2.3 Estoque de carbono orgânico (EC)

O estoque de carbono orgânico (EC) foi estimado para as três camadas de solo avaliadas em cada ponto amostrado conforme proposto por Arevalo et al. (2002) e Andréa et al. (2004), por meio da aplicação da equação:

$$EC = (CO \times Ds \times E) / 10$$

Em que:

EC= corresponde ao estoque de carbono orgânico na profundidade considerada (Mg ha⁻¹);

CO= é o teor de carbono orgânico total (g kg⁻¹);

Ds= representa a densidade do solo da respectiva camada (kg dm⁻³), determinada a partir de amostras indeformadas;

E= é a espessura da camada avaliada (cm).

3.4.3 Atributos Microbiológicos

3.4.3.1 Carbono na biomassa microbiana

O teor de carbono da biomassa microbiana (C-BM) foi determinado pelo método de fumigação-extração descrito por Vance et al. (1987), empregando 20 g de solo por amostra. O processo de fumigação consistiu na incubação das amostras em um dessecador contendo um recipiente com clorofórmio, por 48 horas, na ausência de luz. A extração

das amostras fumigadas e não fumigadas foi realizada utilizando 80 ml de solução de K_2SO_4 0,5 mol L^{-1} , agitando-as por 30 minutos, e em seguida filtrando a suspensão em papel filtro Whatman nº 42.

Para determinar o teor de carbono da biomassa microbiana (C-BM), uma alíquota de 8,0 ml do extrato foi transferida para um erlenmeyer. Em seguida, serão adicionados 2,0 ml de dicromato de potássio 66,7 mM ($K_2Cr_2O_7$), 10,0 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 5,0 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado e aquecidos em fervura branda por 60 minutos. Posteriormente, a titulação foi realizada com sulfato ferroso amoniacal ($Fe(NH_4)_2 6H_2O$) 33,3 mM, utilizando ferroína como indicador.

Os resultados foram calculados usando a seguinte fórmula:

$$C-BM = (F - NF) / Kc$$

Onde:

- C-BM (μg C g solo seco $^{-1}$) é igual amostra fumigada menos a não fumigada dividido pelo fator de correção (0,33) específico para solos tropicais proposto por Feigl et al. (1995).

3.4.3.2 Respiração Basal

Para avaliar a respiração basal do solo, foram pesadas 100 g/solo de cada amostra com três repetições, as quais foram umedecidas até atingir 60% da capacidade máxima de retenção de água (22, 5 mL). O solo foi incubado em recipiente hermético por 5 dias, em câmara escura com temperatura ajustada para 28°C. Para captar o dióxido de carbono liberado pelo solo, foi utilizada a solução de 10 mL NaOH 1N em erlenmeyer, os quais foram introduzidos nos recipientes herméticos com o solo incubado, estes foram tampados para não entrar ar e colocados na incubadora por mais 2 dias.

Após o período de incubação (7 dias), o frasco contendo a solução de NaOH foi removida do recipiente de incubação e foi adicionado 1 mL de cloreto de bário ($BaCl_2$) a 50% (m/v) para precipitar completamente o CO_2 . Em seguida, foi realizada a titulação do CO_2 , adicionando 2 gotas de fenolftaleína a 1% (m/v) em cada frasco e titulando sob agitação magnética com solução padronizada de ácido clorídrico 0,5M (Silva; Azevedo; De-Polli, 2007). O cálculo da respiração basal do solo foi realizado pela seguinte equação:

$$RBS \text{ (mg de C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}) = (((Vb-Va) \cdot M \cdot 6 \cdot 1000)/Ps)/T$$

Onde:

RBS é carbono oriundo da respiração basal do solo; Vb (mL) é o volume de ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle (branco);

Va (mL) é o volume gasto na titulação da amostra;

M é a molaridade exata do HCl;

Ps (g) é a massa de solo seco;

T é o tempo de incubação da amostra em horas.

3.4.3.3 Quocientes metabólico e microbiano

O quociente microbiano (qMic) foi calculado conforme Jenkinson e Ladd (1981), pela razão entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total (COT). Já o quociente metabólico (qCO₂) foi calculado de acordo com Anderson e Domsch (1978), pela razão entre a respiração basal (RB) e o carbono da biomassa microbiana (CBM), expresso em mg CO₂ – C mg⁻¹ CBM dia.

3.4.3.4 Atividades Enzimáticas

3.4.3.4.1 Fosfatase Ácida

A atividade da fosfatase ácida do solo foi quantificada segundo a metodologia proposta por Eivazi e Tabatabai (1977), com adaptações. Para isso, 1,0 g de solo seco foi transferido, em duplicata, para tubos de ensaio, aos quais se adicionaram 4,0 mL de tampão universal modificado, ajustado para pH 6,5. O tampão foi preparado a partir de tris (hidroximetil) aminometano, ácido maléico, ácido cítrico e ácido bórico, com ajuste de pH realizado por meio da adição de HCl 1 mol L⁻¹.

Em seguida, foi incorporado 1,0 mL de solução de p-nitrofenil fosfato dissódico (0,025 mol L⁻¹), utilizado como substrato enzimático. As amostras foram incubadas em banho-maria a 37 °C, durante uma hora, na ausência de luz. Após o período de incubação, a reação foi interrompida mediante a adição de 1,0 mL de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ e 4,0 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹.

A curva de calibração foi obtida a partir de soluções padrão de p-nitrofenol, às quais foram adicionados 1,0 mL de CaCl₂ (0,3 mol L⁻¹) e 4,0 mL de NaOH (0,5 mol L⁻¹). Tanto as amostras quanto as soluções padrão foram filtradas em papel filtro Whatman n°

2, e a concentração de p-nitrofenol formada foi determinada por espectrofotometria, a 410 nm. Os resultados foram expressos em μg de p-nitrofenol g^{-1} de solo h^{-1} .

3.4.3.4.2 Arilsulfatase

A atividade da enzima arilsulfatase do solo foi determinada com base no procedimento proposto por Tabatabai e Bremner (1970). Para tal, amostras de 1,0 g de solo seco foram acondicionadas, em duplicata, em tubos de ensaio, aos quais se adicionaram 4,0 mL de tampão acetato $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, ajustado para pH 5,8. O tampão foi preparado a partir da dissolução de acetato de sódio em água destilada, com posterior adição de ácido acético glacial, completando-se o volume final para 1 L.

Em seguida, foi incorporado 1,0 mL de solução de p-nitrofenil sulfato de potássio (PNS), na concentração de $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, empregado como substrato da reação enzimática. As amostras foram incubadas em banho-maria a $37 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 1 hora, em ambiente protegido da luz. Após o período de incubação, a reação foi interrompida pela adição de 1,0 mL de CaCl_2 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e 4,0 mL de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$.

Posteriormente, as soluções foram filtradas, e a quantidade de p-nitrofenol liberada foi quantificada por espectrofotometria, utilizando comprimento de onda de 410 nm. A quantificação foi realizada com base em curva de calibração construída a partir de soluções padrão de p-nitrofenol, analisadas no mesmo comprimento de onda. Os resultados foram expressos em μg de p-nitrofenol g^{-1} de solo h^{-1} .

3.4.3.4.3 Beta-Glicosidase

A atividade da enzima β -glicosidase no solo foi avaliada com base no método descrito por Eivazi e Tabatabai (1988). Para esse fim, foram adicionados, em tubos de ensaio, 1,0 g de solo seco, 4,0 mL de tampão universal modificado (MUB), ajustado para pH 6,0, e 1,0 mL de solução de p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo (PNG) na concentração de $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, utilizada como substrato enzimático. As determinações foram realizadas em duplicata para cada amostra.

Após a preparação, os tubos foram incubados em banho-maria a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período de 1 hora. Em seguida, a reação foi interrompida mediante a adição de 1,0 mL de CaCl_2 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e 4,0 mL de solução de Tris $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, ajustada para pH 12.

Posteriormente, as amostras foram filtradas em papel filtro Whatman nº 42, e a quantidade de p-nitrofenol liberada foi determinada por espectrofotometria, utilizando comprimento de onda de 400 nm.

A quantificação foi realizada com auxílio de curva de calibração elaborada a partir de soluções padrão de p-nitrofenol, lidas no mesmo comprimento de onda. Os resultados foram expressos em μg de p-nitrofenol g^{-1} de solo h^{-1} .

3.5 Produtividade de Colmos

A produtividade de colmos (TCH, Mg ha^{-1}) foi estimada com base na metodologia proposta por Silva et al. (2017), conforme a seguinte equação:

$$\text{TCH} = (\text{P10C}/10) * \text{NCM} * (10/\text{E})$$

Sendo:

TCH= Tonelada de Colmos por ha^{-1}

P10C= Massa de dez colmos (kg) ou peso de 10 colmos em kg;

10= Fator de Divisão

NCM= Números de colmos por metro linear

10= Fator de correção

E= Espaçamento entrelinha de plantio (m)

3.6 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando detectada significância pelo teste F, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Realizou-se a análise de correlação de Pearson, com o intuito de identificar associações lineares entre os atributos avaliados. Os valores do coeficiente de correlação (r) foram interpretados conforme a seguinte classificação: $r < 0,30$, correlação fraca; $0,30 \leq r \leq 0,50$, correlação moderada; e $r > 0,50$, correlação forte (Cohen, 1988). As análises estatísticas foram conduzidas utilizando-se o software Sisvar, versão 5.3 para Windows, enquanto os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados por meio de funções do Microsoft Excel.

4. RESULTADOS

A análise de variância (ANOVA) foi realizada considerando os efeitos dos fatores preparo do solo, profundidade e sua interação. Quando a interação foi significativa, os efeitos foram desdobrados, analisando-se os fatores dentro de cada nível do outro. Na ausência de interação significativa, os fatores foram interpretados de forma isolada, considerando as médias gerais.

4.1 Atributos Físicos

4.1.1 Argila dispersa em água e índice de floculação

Para a ADA, houve efeito da profundidade e do preparo do solo ($p \leq 0,05$). Para o IF, verificou-se efeito significativo do preparo do solo ($p \leq 0,05$), sem influência da profundidade. Nos dois atributos a interação entre preparo do solo e profundidade não foi significativa, indicando independência entre os fatores (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância para os atributos argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	ADA (F)	IF (F)
Preparos do solo	4	2,561*	3,106*
Profundidades	2	3,663*	0,827 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	0,426 ^{ns}	1,134 ^{ns}
Blocos	3	7,585*	7,613*
Erro	42		

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 7,45 (ADA) e 21,16 (IF).

O preparo com arado de aiveca + grade niveladora apresentou o maior valor de ADA (189 g kg⁻¹), enquanto o menor valor foi registrado no manejo de menor revolvimento, como no plantio direto (172 g kg⁻¹) (Figura 4A). Quanto ao fator profundidade, verificou-se aumento dos valores de ADA com a profundidade, variando de 174 a 187 g kg⁻¹ (Figura 4B).

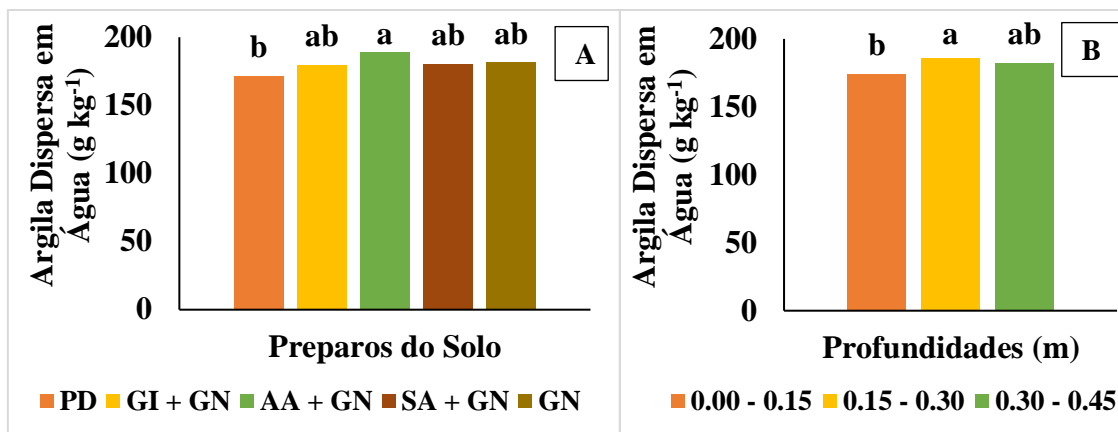


Figura 4. Argila Dispersa em Água do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e *GN* – Grade Niveladora.

Para o índice de floculação, o plantio direto apresentou o maior valor (29,86%), diferindo do preparo com arado de aiveca + grade niveladora, que apresentou o menor valor (22,53%) (Figura 5A). Em relação à profundidade, os valores de IF variaram de 25,55 a 27,69 % ao longo do perfil do solo

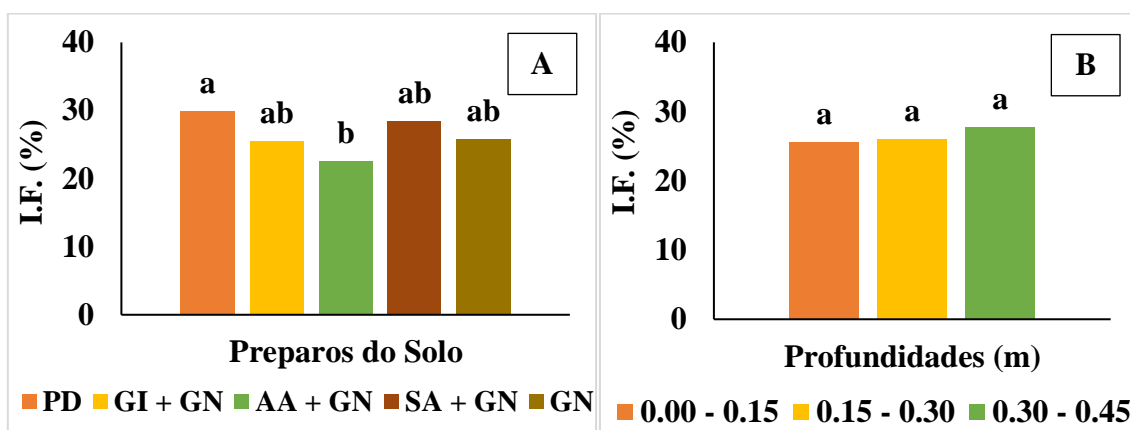


Figura 5. Índice de Floculação (IF) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.1.2 Densidade e Porosidade do solo

Não foram observadas diferenças na DS entre os preparos do solo, sendo identificado efeito apenas da profundidade ($p \leq 0,05$). Em relação à PT, verificou-se influência dos preparos do solo ($p \leq 0,05$), sem efeito da profundidade.

Os atributos MACRO e MICRO foram influenciados tanto pelos preparos do solo quanto pela profundidade ($p \leq 0,05$). A interação entre os fatores não foi significativa para nenhum dos atributos, indicando independência entre preparo do solo e profundidade (Tabela 4).

Tabela 4. Análise de variância para os atributos densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	DS (F)	PT (F)	MACRO (F)	MICRO (F)
Preparos do solo	4	2,000 ^{ns}	5,368 [*]	11,324 [*]	3,390 [*]
Profundidades	2	4,788 [*]	0,173 ^{ns}	19,836 [*]	3,259 [*]
Preparos × Profundidades	8	0,855 ^{ns}	1,697 ^{ns}	1,510 ^{ns}	1,689 ^{ns}
Blocos	3	0,901 ^{ns}	1,795 ^{ns}	0,652 ^{ns}	2,217 ^{ns}
Erro	42				

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 3,28 (DS), 7,93 (PT), 16,27 (MACRO) e 9,24 (MICRO).

Os valores de densidade do solo nos diferentes sistemas de preparo situaram-se entre 1,71 e 1,77 Mg m^{-3} (Figura 6A). Em relação à profundidade, verificou-se redução gradual da densidade com o aumento da camada avaliada, sendo o maior valor registrado na camada de 0,00–0,15 m (1,76 Mg m^{-3}), seguido pela camada de 0,15–0,30 m (1,75 Mg m^{-3}), enquanto o menor valor foi observado na camada de 0,30–0,45 m (1,71 Mg m^{-3}) (Figura 6B).

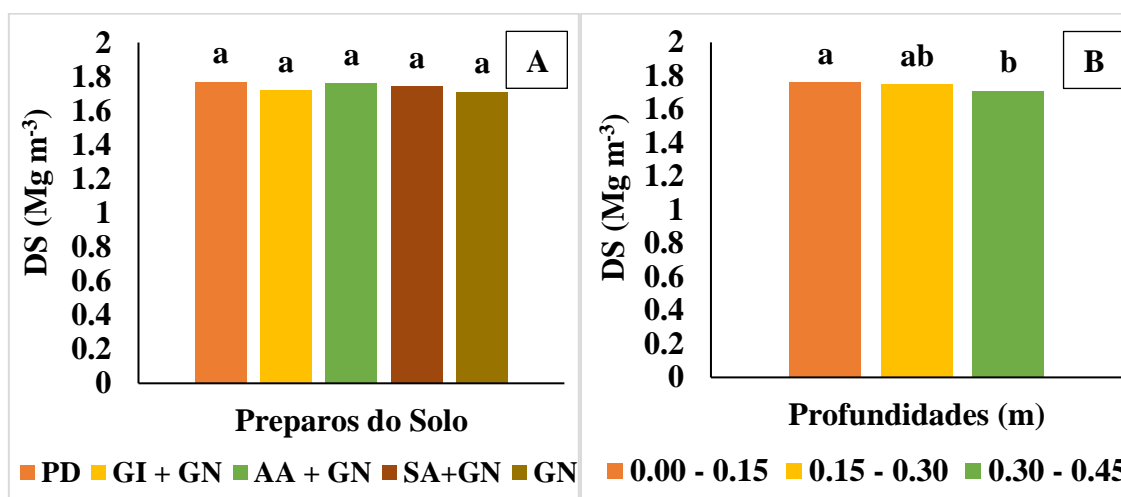


Figura 6. Densidade (DS) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

A porosidade total (PT) variou entre 0,33 e 0,38 m³ m⁻³ entre os sistemas de preparo, sendo os maiores valores observados nos preparos com grade intermediária + grade niveladora (0,38 m³ m⁻³) e arado de aiveca + grade niveladora (0,37 m³ m⁻³), enquanto o plantio direto apresentou o menor valor (0,33 m³ m⁻³) (Figura 7A). Em relação à profundidade, os valores de PT variaram de 0,35 a 0,36 m³ m⁻³ ao longo do perfil do solo (Figura 7B).

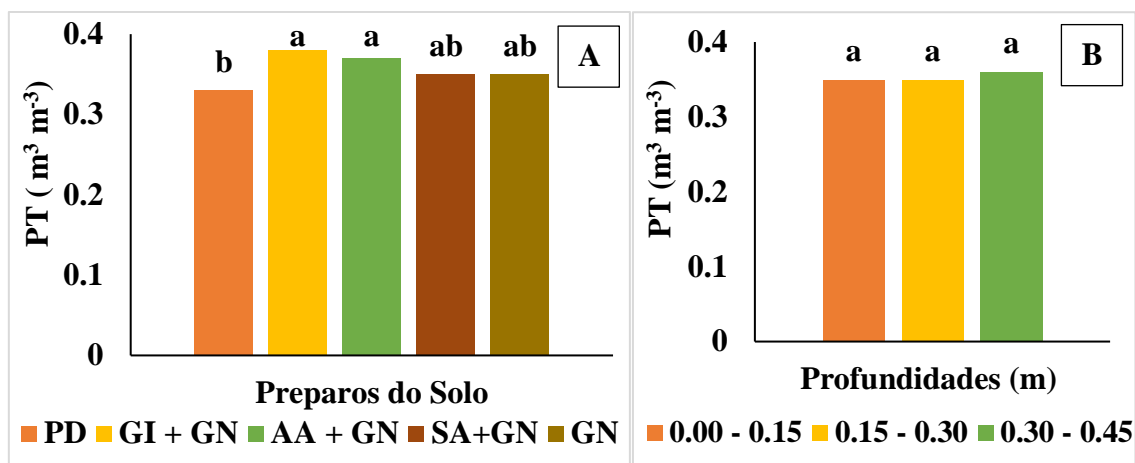


Figura 7. Porosidade total (PT) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

A macroporosidade apresentou variação entre os sistemas de preparo, com maior valor observado no preparo com grade intermediária + grade niveladora (0,094 m³ m⁻³), seguido pelo arado de aiveca + grade niveladora (0,085 m³ m⁻³). Os menores valores foram registrados no plantio direto (0,074 m³ m⁻³) e na grade niveladora (0,061 m³ m⁻³) (Figura 8A).

Em relação à profundidade, a menor macroporosidade foi observada na camada superficial (0,00–0,15 m), com 0,065 m³ m⁻³, seguida pela camada de 0,15–0,30 m (0,078 m³ m⁻³). O maior valor ocorreu na camada mais profunda (0,30–0,45 m), com 0,091 m³ m⁻³ (Figura 8B).

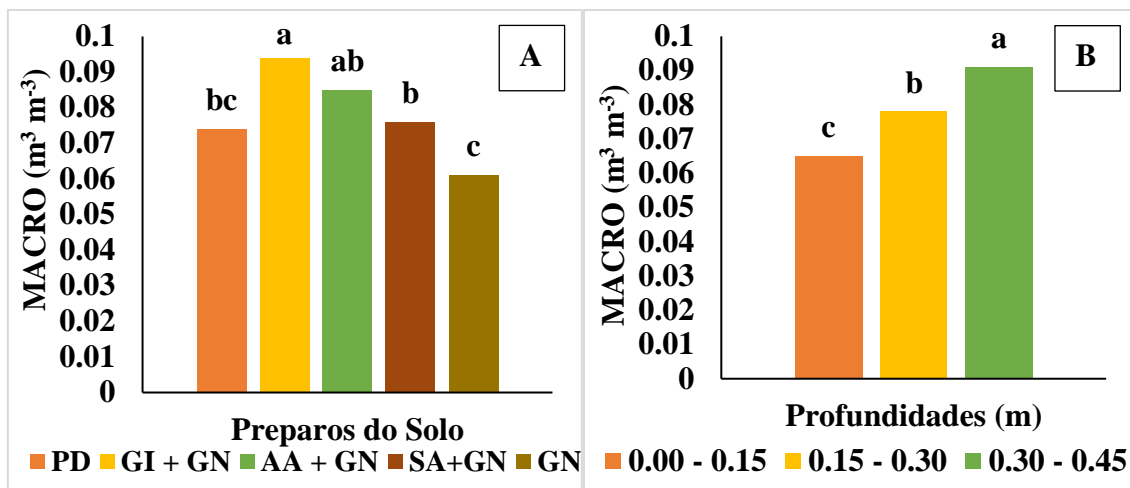


Figura 8. Macroporosidade (MACRO) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

A microporosidade foi maior nos manejos com arado de aiveca + grade niveladora e grade niveladora ($0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), e menor no plantio direto ($0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Figura 9A). Com a profundidade, os valores reduziram de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada superficial para $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada mais profunda (Figura 9B).

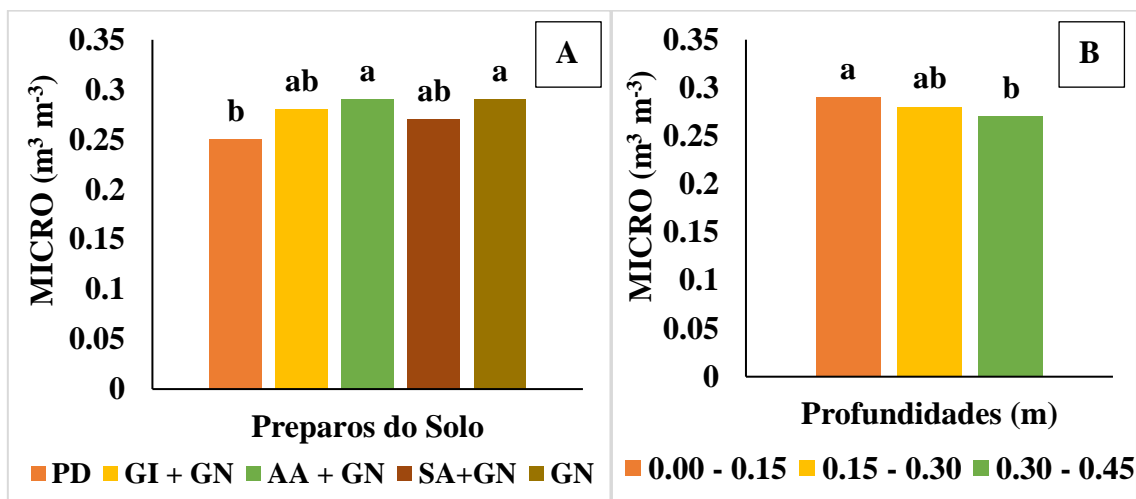


Figura 9. Microporosidade (MICRO) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.1.3 Retenção de água no solo e limites hídricos

As curvas de retenção de água do solo apresentaram comportamento típico, com redução do teor de água a medida que aumentou o potencial mátrico, independentemente do sistema de preparo e profundidade avaliada.

Na camada de 0,00-0,15 m, observou-se comportamento semelhante entre os preparos ao longo de todos os pontos matriciais. De modo geral, o plantio direto apresentou tendência de maiores teores de água em potenciais mais elevados, enquanto os demais preparos mostraram comportamento próximo entre si, com leve convergência das curvas em tensões mais altas, e se aproximando na tensão de 1.500 KPa (Figura 10).

Na camada 0,15-0,30 m, verificou-se maior distinção entre os sistemas de manejo, sobretudo nas menores tensões. O preparo com subsolador de arrasto + grade niveladora apresentou maiores teores de água ao longo da curva, destacando-se dos demais. À medida que o potencial mátrico aumentou, as diferenças entre os preparos foram reduzidas, com aproximação das curvas em tensões mais elevadas (Figura 11).

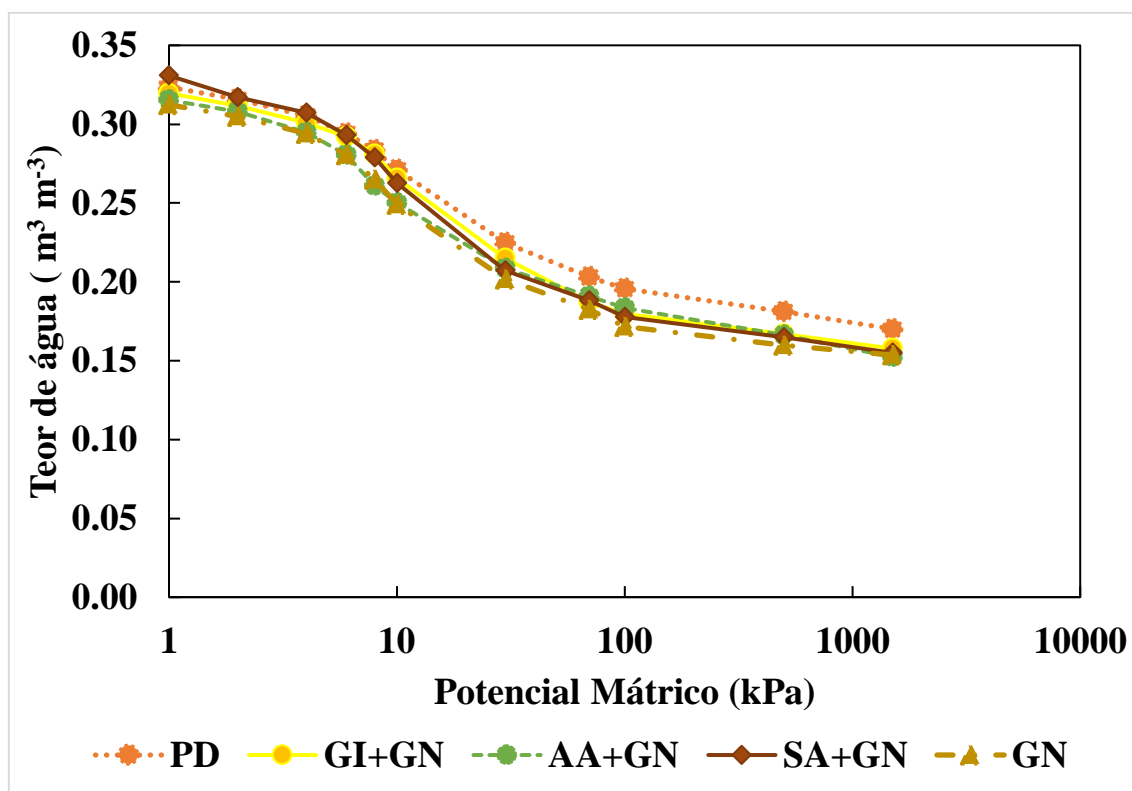


Figura 10. Curva de retenção de água no solo, na camada de 0,00–0,15 m, em função dos sistemas de preparo do solo e da posição de amostragem.

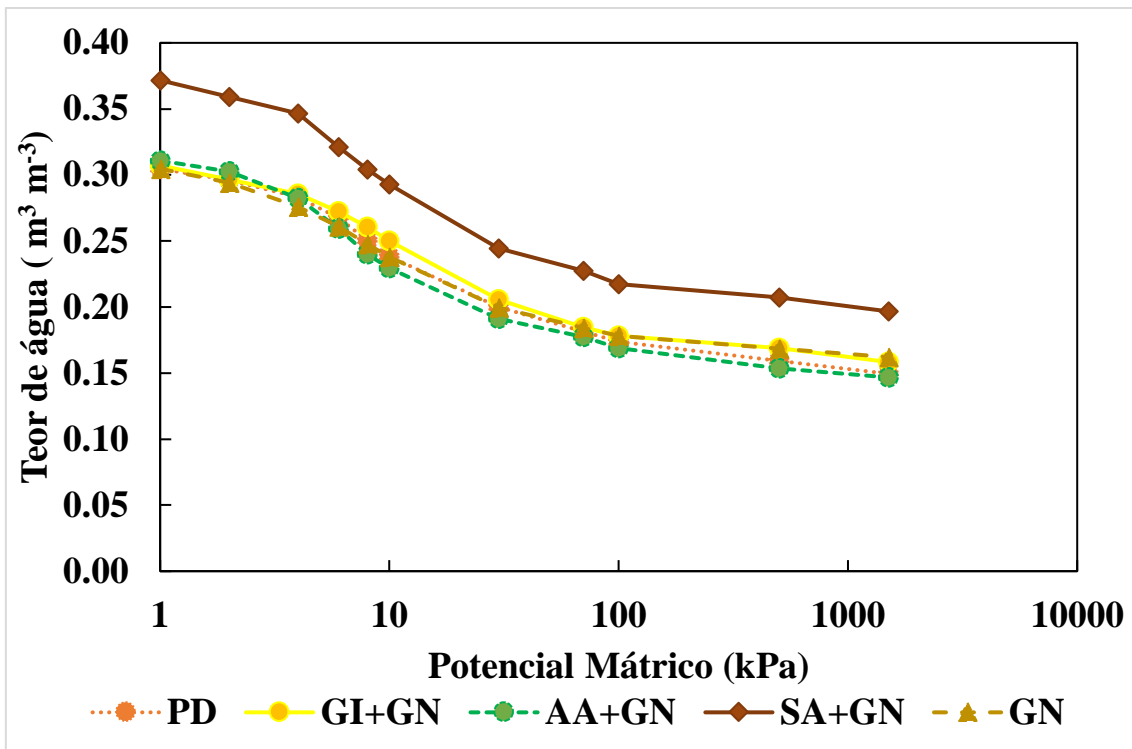


Figura 11. Curva de retenção de água no solo, na camada de 0,15–0,30 m, em função dos sistemas de preparo do solo e da posição de amostragem.

Já na camada de 0,30-0,45 m, observou-se maior separação entre os manejos nos pontos de menor potencial mátrico, com destaque para o preparo grade intermediária + grade niveladora, que apresentou maiores teores de água. Com aumento da tensão, ocorreu redução gradual das diferenças, embora ainda se mantenha certa distinção entre os manejos nas maiores tensões (Figura 12). Contudo, verificou-se tendência de retenção de água nos preparos com menor revolvimento do solo, especialmente nas tensões mais elevadas.

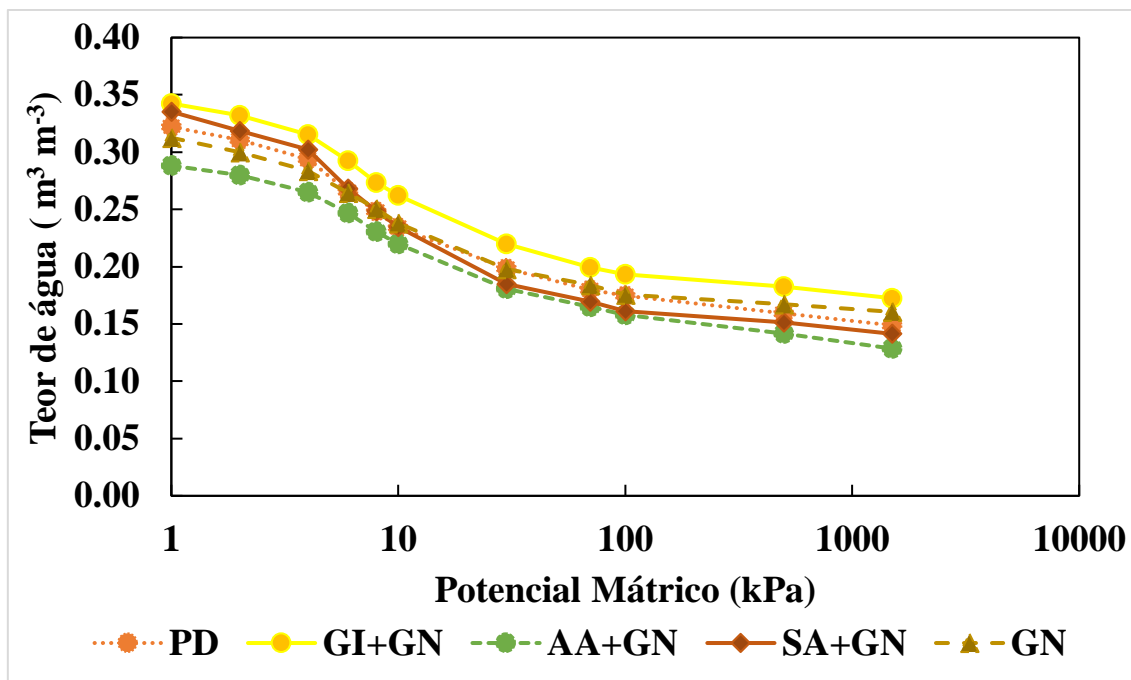


Figura 12. Curva de retenção de água no solo, na camada de 0,30–0,45 m, em função dos sistemas de preparo do solo e da posição de amostragem.

Para fins de comparação estatística, os valores de capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) foram submetidos à análise de variância (Tabela 5).

Tabela 5. Análise de variância para os atributos capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	CC (F)	PMP (F)
Preparos do solo	4	2,540 ^{ns}	0,434 ^{ns}
Profundidades	2	3,575 [*]	0,891 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	1,376 ^{ns}	0,989 ^{ns}
Blocos	3	3,065 [*]	3,390 [*]
Erro	42		

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 10,39 (CC) e 18,59 (PMP).

Não foram observadas diferenças significativas em CC e PMP entre os sistemas de preparo do solo, sendo identificado efeito apenas da profundidade sobre a CC ($p \leq 0,05$). O PMP não apresentou efeito da profundidade. A interação entre os fatores não foi significativa para nenhum dos atributos, indicando independência entre preparo do solo e profundidade (Tabela 5).

Os valores médios de CC variaram de 0,23 a 0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. A similaridade entre os manejos de preparo do solo demonstra que o processo de retenção hídrica após o equilíbrio matricial é pouco influenciado pelas operações mecânicas realizadas (Figura

13A). A profundidade influenciou a capacidade de campo (CC), com tendência de redução ao longo do perfil (Figura 13B).

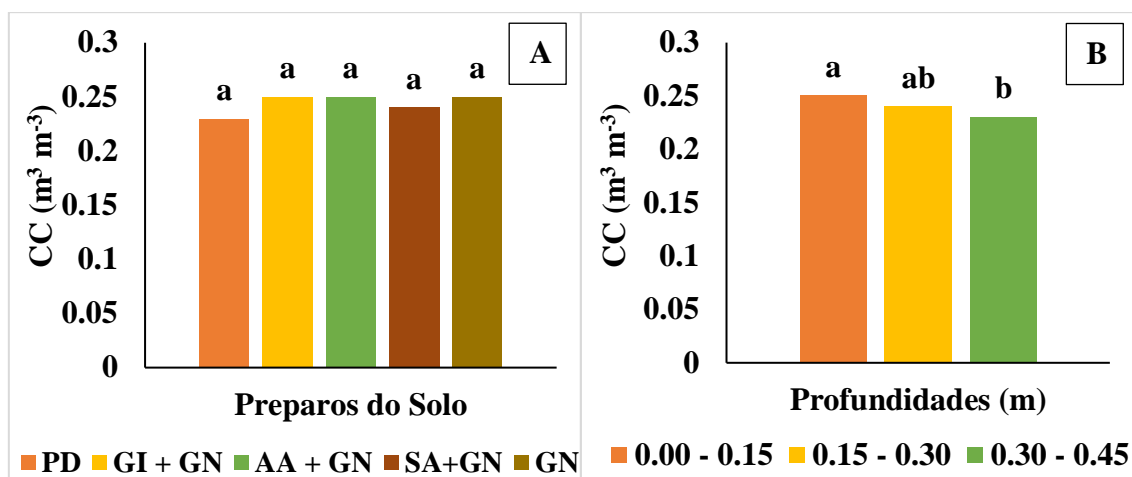


Figura 13. Capacidade de campo (CC) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.1.4 Condutividade hidráulica

Não foram observados efeitos dos sistemas de preparo do solo, das profundidades de avaliação ou da interação entre esses fatores ($p > 0,05$) para a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) (Tabela 6). O coeficiente de variação foi de 58,01%, indicando elevada variabilidade nos dados.

Tabela 6. Análise de variância para o atributo condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	K_{sat} (F)
Preparos do solo	4	2,178 ^{ns}
Profundidades	2	1,134 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	0,096 ^{ns}
Blocos	3	4,773 [*]
Erro	42	

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 58,01 (K_{sat}).

4.1.5 Estabilidade de Agregados

A análise de variância indicou efeito dos sistemas de preparo do solo sobre o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) ($p \leq 0,05$). Para o DMG, também foi observada interação entre os fatores, enquanto para o DMP não houve efeito da interação.

As profundidades não influenciaram DMG e DMP ($p > 0,05$). Os coeficientes de variação foram de 26,43% para DMG e 49,81% para DMP, indicando maior variabilidade para esta última variável.

Tabela 7. Análise de variância para os atributos diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIÇÃO	GL	DMG (F)	DMP (F)
Preparos do solo	4	8,422*	9,198*
Profundidades	2	2,387 ^{ns}	1,902 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	2,103*	0,773 ^{ns}
Blocos	3	6,271*	8,036*
Erro	42		

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 26,43 (DMG) e 49,81 (DMP).

Diante da interação observada para o diâmetro médio geométrico (DMG), os desdobramentos são apresentados na Figura 14. Na profundidade de 0,00–0,15 m, o preparo com grade niveladora apresentou maior valor de DMG (0,77 mm), diferindo dos demais tratamentos, exceto do preparo com subsolador de arrasto + grade niveladora. O menor valor foi observado no preparo com arado de aiveca + grade niveladora (0,29 mm).

Na profundidade de 0,15–0,30 m, não foram observadas diferenças entre os tratamentos (Figura 14). Na camada de 0,30–0,45 m, o preparo com arado de aiveca + grade niveladora apresentou menor valor de DMG (0,33 mm), inferior ao preparo com grade niveladora (0,56 mm).

Considerando o comportamento ao longo do perfil, o preparo com grade niveladora foi o único a apresentar variação entre as profundidades, com maior valor na camada superficial (0,00–0,15 m), redução na camada intermediária (0,15–0,30 m) e valor intermediário na camada mais profunda (0,30–0,45 m).

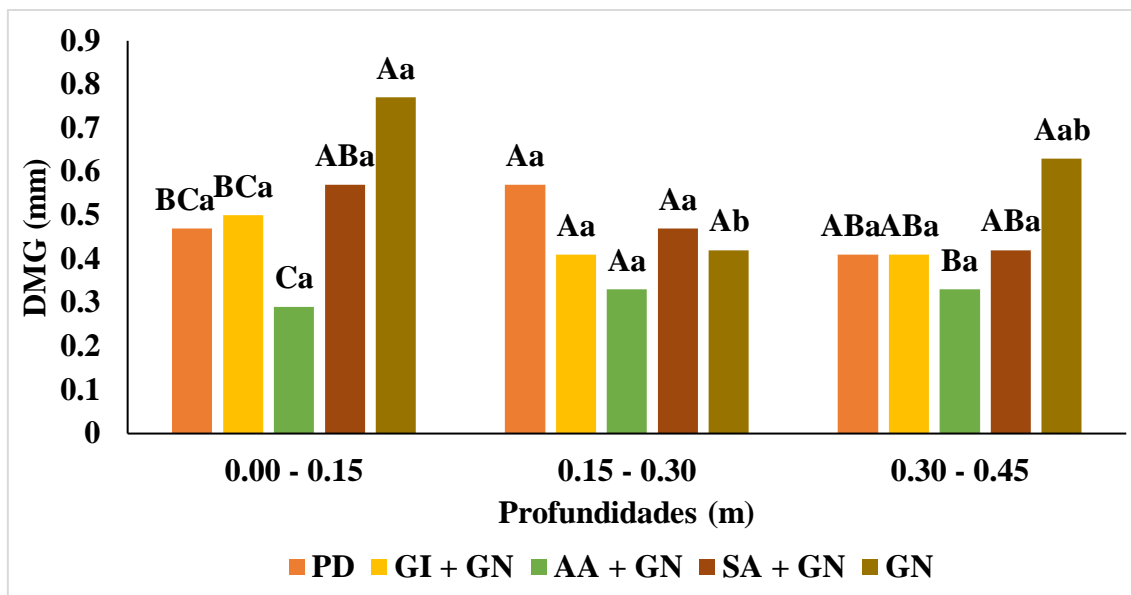


Figura 14. Diâmetro médio geométrico (DMG) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo de solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Para o diâmetro médio ponderado (DMP), os maiores valores foram observados nos preparos com grade niveladora (1,59 mm), subsolador de arrasto + grade niveladora (1,36 mm) e plantio direto (1,36 mm). O preparo com grade niveladora apresentou valor superior ao obtido com arado de aiveca + grade niveladora (0,36 mm) (Figura 15A).

Não foram observadas diferenças entre as profundidades avaliadas, com valores de 1,30, 1,09 e 0,96 mm para as camadas de 0,00–0,15, 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m, respectivamente (Figura 15B).

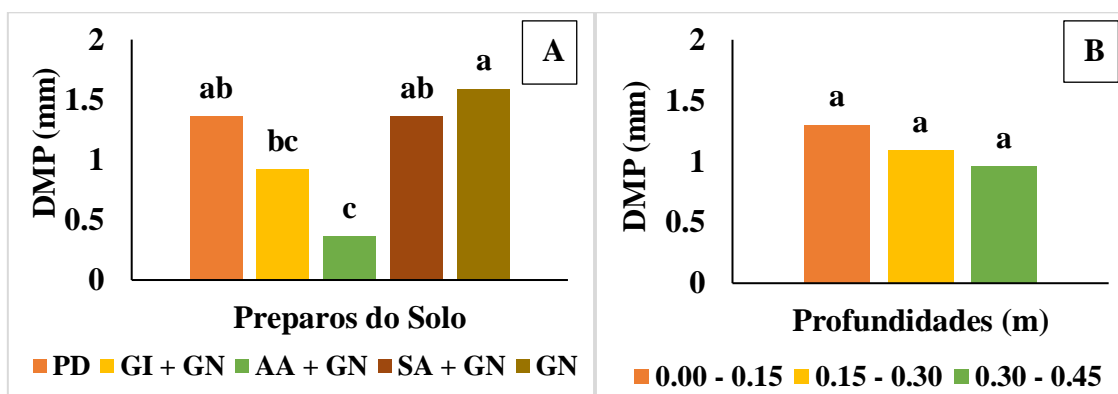


Figura 15. Diâmetro médio ponderado (DMP) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.1.6 Resistência do solo à penetração

A análise de variância para a resistência à penetração do solo (RP) indicou efeito dos sistemas de preparo do solo e das profundidades de avaliação ($p \leq 0,05$), sem interação entre esses fatores.

Tabela 8. Análise de variância para o atributo resistência à penetração do solo em laboratório (RP) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	RP (F)
Preparos do solo	4	20,741*
Profundidades	2	43,400*
Preparos × Profundidades	8	0,833 ^{ns}
Blocos	3	1,129 ^{ns}
Erro	42	

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 16,63 (RP).

Para a resistência à penetração do solo (RP), os valores variaram de 1,31 a 2,19 MPa. O preparo com grade niveladora apresentou o maior valor (2,19 MPa), superior aos demais tratamentos. O plantio direto apresentou valor intermediário (1,68 MPa), enquanto os preparos com grade intermediária + grade niveladora (1,31 MPa) e arado de aiveca + grade niveladora (1,33 MPa) apresentaram os menores valores, sem diferença entre si (Figura 16A).

Em relação às profundidades, observou-se redução dos valores de RP com o aumento da profundidade (Figura 16B), com maiores valores na camada de 0,00–0,15 m (2,07 MPa), seguidos por 0,15–0,30 m (1,49 MPa) e 0,30–0,45 m (1,31 MPa).

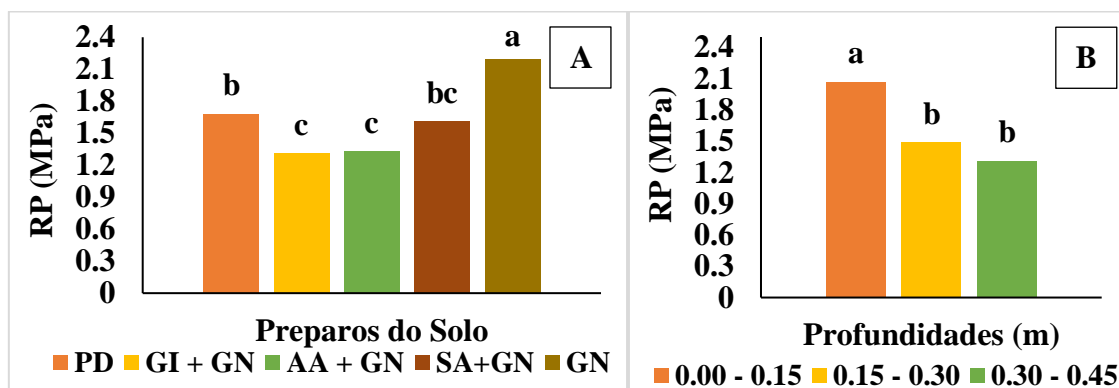


Figura 16. Resistência à penetração (RP) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. PD – Plantio Direto; GI+GN – Grade Intermediária + Grade Niveladora; AA+GN – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; SA+GN – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; GN – Grade Niveladora.

4.2 Atributos Químicos

4.2.1 Carbono Orgânico do Solo

A análise de variância evidenciou efeito dos sistemas de preparo do solo, das profundidades avaliadas e da interação entre esses fatores sobre os teores de carbono orgânico do solo (COS). Para o estoque de carbono orgânico total (EstC), observou-se efeito significativo dos preparos do solo (Tabela 9).

Tabela 9. Análise de variância para os atributos carbono orgânico (COS) e estoque de carbono orgânico total (EstC).

FONTE DE VARIÇÃO	GL	COS (F)	FONTE DE VARIÇÃO	EstC (F)
Preparos do solo	4	8,158*	Preparos do solo	5,574*
Profundidades	2	6,939*	Blocos	1,857 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	5,357*	Erro	
Blocos	3	0,769 ^{ns}		
Erro	42			

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 9,34 (COS) e 5,93 (EstC).

Diante da interação significativa, o carbono orgânico variou em função dos sistemas de preparo ao longo das profundidades avaliadas. Na camada superficial (0,00–0,15 m), os maiores teores de COS foram observados nos tratamentos com subsolador de arrasto + grade niveladora e grade niveladora, não diferiram estatisticamente entre si e em relação ao plantio direto. Os menores valores foram registrados nos preparos com arado de aiveca + grade niveladora e grade intermediária + grade niveladora (Figura 17A).

Na camada de 0,15–0,30 m, o maior teor de COS foi verificado no plantio direto. Em contrapartida, os menores valores foram observados nos tratamentos com arado de aiveca + grade niveladora e subsolador de arrasto + grade niveladora, bem como na grade niveladora, enquanto o preparo com grade intermediária + grade niveladora apresentou valor intermediário (Figura 17A).

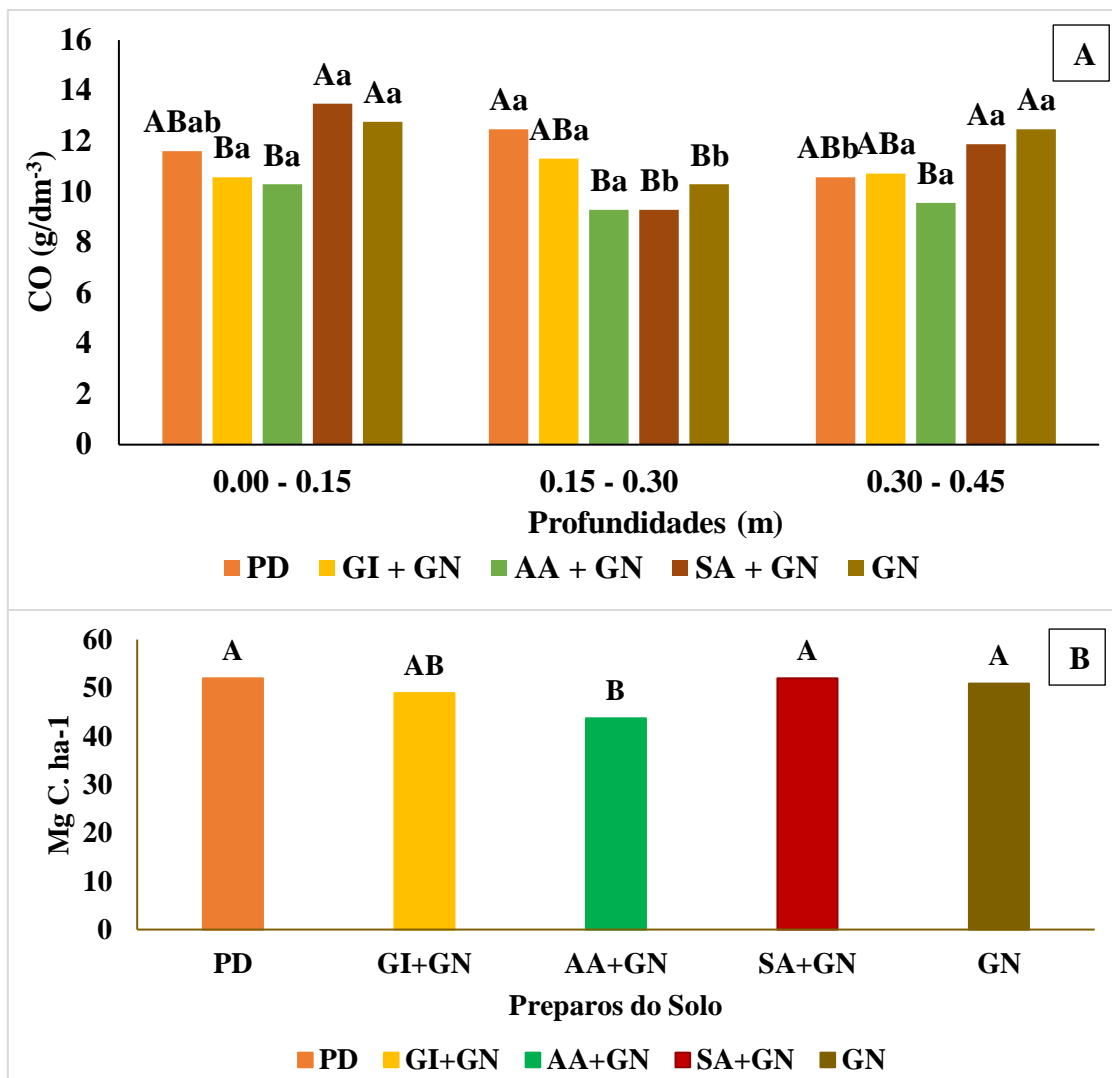


Figura 17. Carbono Orgânico do Solo (COS – A) e Estoque de Carbono Orgânico (EstC – B) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. EstC: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. COT: Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Na camada de 0,30–0,45 m, os maiores teores de COS foram observados nos tratamentos com grade niveladora e subsolador de arrasto + grade niveladora, em relação aos demais sistemas de preparo (Figura 17A).

Considerando o desdobramento das profundidades dentro de cada sistema de preparo, verificou-se que, o preparo com arado de aiveca + grade niveladora apresentou, de forma consistente, os menores teores de COS ao longo de todo o perfil avaliado, não sendo constatadas diferenças entre as profundidades. Comportamento análogo foi observado para o preparo com grade intermediária + grade niveladora, evidenciando ausência de variação entre as camadas (Figura 17A).

Os preparos com subsolador de arrasto + grade niveladora e com grade niveladora apresentaram maiores teores de carbono nas camadas superficial e profunda, em relação à camada intermediária. O plantio direto apresentou maiores teores nas camadas superficial e intermediária, sem diferença estatística entre essas (Figura 17A).

Os maiores valores de estoque de carbono orgânico do solo foram observados no plantio direto (51,98) e no preparo com subsolador de arrasto + grade niveladora (51,98), os quais não diferiram estatisticamente da grade niveladora (50,89). O tratamento com grade intermediária + grade niveladora apresentou valor intermediário (48,93), não diferindo dos tratamentos com maiores e menores médias. Por outro lado, o preparo com arado de aiveca + grade niveladora apresentou o menor teor de carbono orgânico do solo (43,71) (Figura 17B).

4.2.2 Parâmetros da Fertilidade do Solo

A análise de variância evidenciou efeito significativo dos sistemas de preparo do solo sobre o pH, Ca^{2+} e Mg^{2+} ($p \leq 0,05$), indicando que o manejo adotado influenciou esses atributos químicos do solo (Tabela 10). Por outro lado, não foi observado efeito significativo das profundidades para nenhum dos atributos avaliados, sugerindo relativa homogeneidade vertical desses atributos no perfil analisado.

A interação entre preparo do solo e profundidade foi significativa para Ca^{2+} e Mg^{2+} ($p \leq 0,05$), indicando que a distribuição desses nutrientes no perfil variou em função dos sistemas de manejo. Para pH, a ausência de interação demonstra que o efeito dos preparos foi consistente entre as profundidades avaliadas. Observou-se ainda efeito significativo de blocos para o pH, evidenciando variabilidade espacial na área experimental para esse atributo (Tabela 10).

Tabela 10. Análise de variância para os atributos potencial de hidrogênio (pH), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	pH (F)	Ca^{2+} (F)	Mg^{2+} (F)
Preparos do solo	4	9,666*	11,823*	8,840*
Profundidades	2	1,518 ^{ns}	2,298 ^{ns}	0,955 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	0,731 ^{ns}	2,593*	2,604*
Blocos	3	6,418*	0,931 ^{ns}	2,217 ^{ns}
Erro	42			

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 4,88 (pH); 19,20 (Ca^{2+}) e 21,83 (Mg^{2+}).

Observou-se que o Plantio Direto (PD) apresentou o maior valor de pH (5,84), indicando menor acidez ativa em comparação aos demais sistemas de preparo. Por sua vez, os tratamentos Arado de Aiveca + Grade Niveladora (AA+GN) e Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora (SA+GN) registraram os menores valores de pH (5,31 e 5,36, respectivamente) (Figura 18).

Em relação à profundidade, não foram observadas diferenças significativas entre as camadas de 0,00 – 0,15 m, 0,15 – 0,30 m e 0,30 – 0,45 m. Apesar das variações entre os sistemas de preparo, o perfil de acidez do solo permaneceu relativamente homogêneo entre as camadas. Tal homogeneidade pode estar relacionada à aplicação de corretivos ou à capacidade tampão natural do solo (Figura 18).

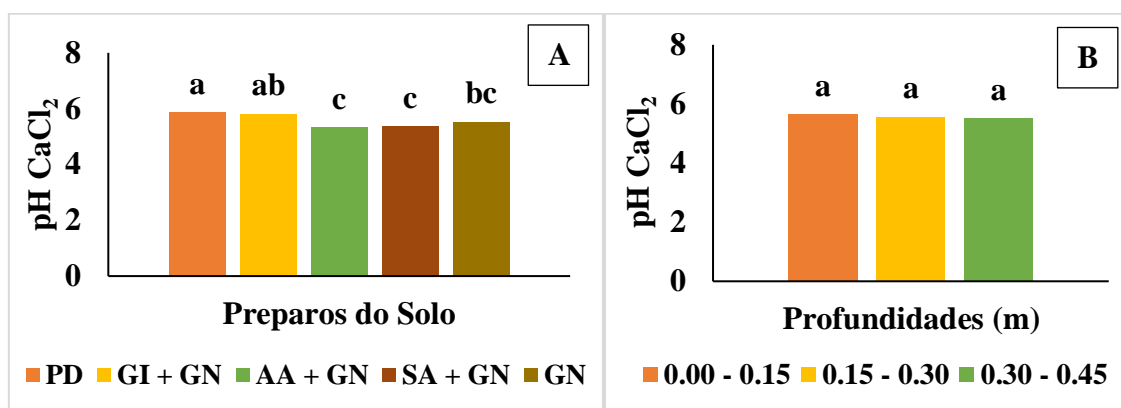


Figura 18. pH em CaCl₂ do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. PD – Plantio Direto; GI+GN – Grade Intermediária + Grade Niveladora; AA+GN – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; SA+GN – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; GN – Grade Niveladora.

Os teores de cálcio trocável (Ca²⁺) variaram de 16,00 a 33,25 mmol_c dm⁻³ entre os tratamentos e profundidades avaliadas (Figura 19). Na camada superficial (0,00–0,15 m), o sistema plantio direto apresentou o maior valor de Ca²⁺ (33,25 mmol_c dm⁻³), enquanto o arado de aiveca + grade niveladora apresentou o menor teor (16,00 mmol_c dm⁻³). Os preparos grade intermediária + grade niveladora e subsolador + grade niveladora apresentaram valores intermediários (25,00 e 28,00 mmol_c dm⁻³, respectivamente).

Na camada intermediária (0,15–0,30 m), os valores de Ca²⁺ diminuíram ligeiramente, mantendo-se entre 17,25 e 28,50 mmol_c dm⁻³. O plantio direto ainda apresentou os maiores teores (28,50 mmol_c dm⁻³), o qual favorece a manutenção de cálcio nas camadas superficiais e intermediárias. Já o arado de aiveca voltou a apresentar os

menores valores ($17,25 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), refletindo o efeito do revolvimento intenso do solo (Figura 19).

Na camada mais profunda (0,30–0,45 m), os teores de Ca^{2+} entre os sistemas, variou de 16,50 a 27,25 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Verifica-se que o plantio direto e a grade intermediária + grade niveladora mantiveram valores relativamente elevados nessa profundidade (26,25 e 27,25 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), havendo o efeito de maior lixiviação ou redistribuição vertical de Ca^{2+} (Figura 19).

Considerando a distribuição ao longo do perfil, o preparo com subsolador de arrasto + grade niveladora foi o único a apresentar variação mais entre as camadas, com maiores teores na superfície e redução na camada mais profunda.

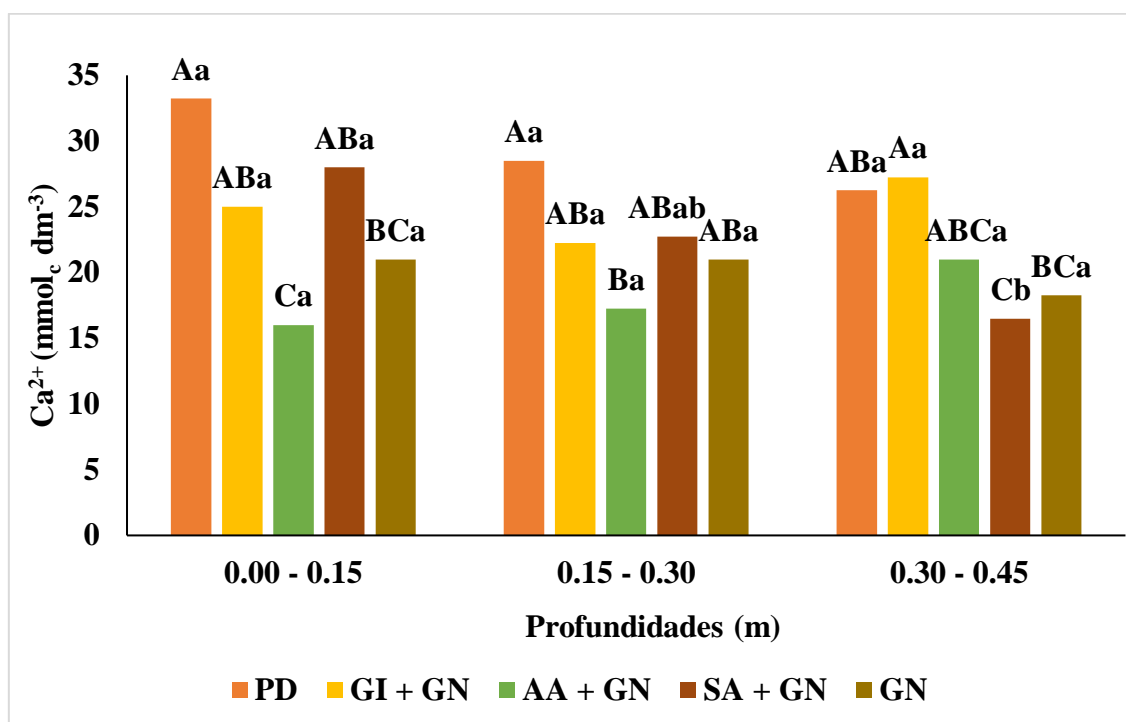


Figura 19. Cálcio (Ca^{2+}) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Os teores de magnésio trocável variaram de 5,00 a 10,50 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ entre os preparos do solo e profundidades avaliadas. Na camada de 0,00–0,15 m, o preparo com a grade Niveladora apresentou o maior teor de Mg^{2+} (10,50 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), diferindo significativamente do Subsolador + Grade Niveladora (5,75 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e do Arado de

Aiveca + Grade Niveladora ($6,25 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). O sistema de Plantio Direto apresentou valor intermediário ($8,25 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), (Figura 20).

Na profundidade de 0,15–0,30 m (Figura 20), os valores de Mg^{2+} variaram entre 5,00 e $9,50 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, novamente com o tratamento Grade Niveladora apresentando o maior teor ($9,50 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). O Plantio Direto manteve $8,50 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, enquanto o Subsolador + Grade Niveladora apresentou o menor valor ($5,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

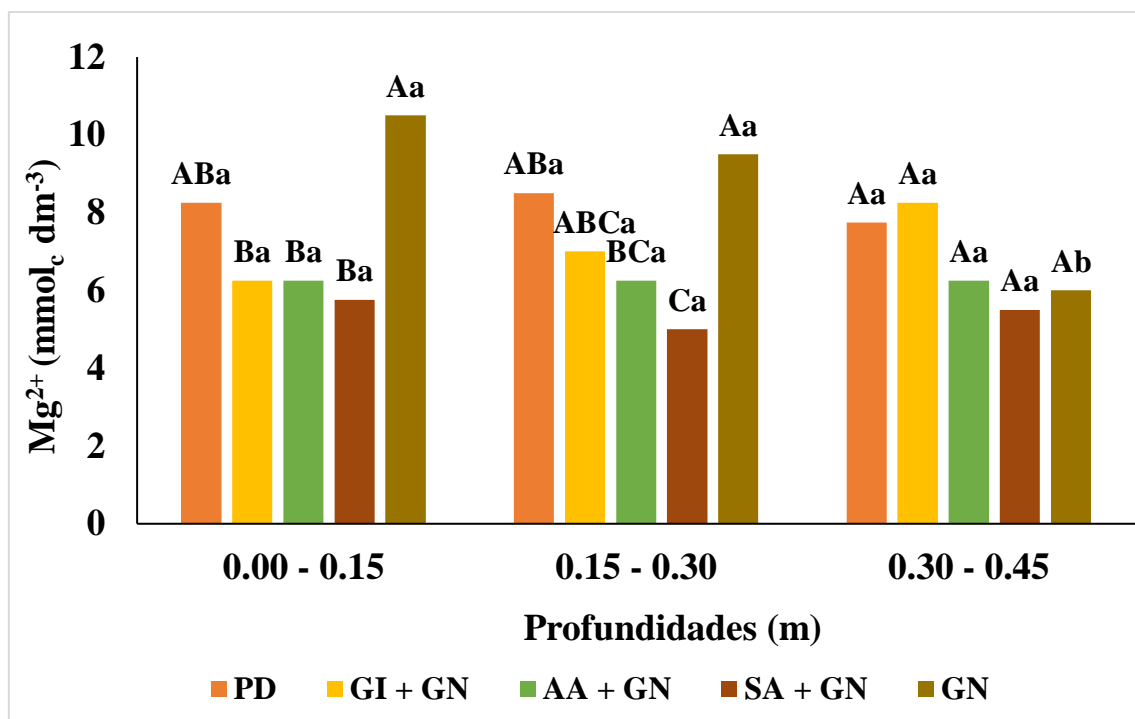


Figura 20. Magnésio (Mg^{2+}) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Na camada mais profunda (0,30–0,45 m, Figura 20), os teores de Mg^{2+} foram ligeiramente menores e mais homogêneos, variando de 5,50 a $8,25 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O preparo com a grade intermediária + grade niveladora ($8,25 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e plantio direto ($7,75 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) mantiveram valores relativamente elevados nessa profundidade, enquanto o subsolador + grade niveladora voltou a apresentar o menor teor ($5,50 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

O preparo com grade niveladora foi o único a apresentar variação nos teores de Mg^{2+} entre as camadas avaliadas, com maiores valores observados nas camadas superficial e intermediária.

A Tabela 11 apresenta a análise de variância para fósforo (P), potássio (K) e acidez potencial (H⁺+Al). Verificou-se efeito significativo dos sistemas de preparo do solo para todos os atributos ($p \leq 0,05$). O fator profundidade apresentou efeito significativo apenas para o fósforo, não sendo observado efeito para K e H⁺+Al.

A interação entre sistemas de preparo e profundidades foi significativa para P, K e H⁺+Al ($p \leq 0,05$), indicando dependência da distribuição desses atributos no perfil do solo em função da combinação entre os fatores.

Tabela 11. Análise de variância para os atributos fósforo (P), potássio (K) e acidez potencial (H+Al) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	P (F)	K (F)	H+Al (F)
Preparos do solo	4	8,743 [*]	7,456 [*]	4,848 [*]
Profundidades	2	17,921 [*]	1,722 ^{ns}	0,836 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	7,752 [*]	3,741 [*]	3,045 [*]
Blocos	3	0,456 ^{ns}	2,882 [*]	0,723 ^{ns}
Erro	42			

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 12,14 (P); 24,77 (K) e 16,12 (H+Al).

Os teores de fósforo disponível variaram entre 23,25 e 44,25 mg dm⁻³. Na camada superficial (0,00–0,15 m), o tratamento com subsolador de arrasto + grade niveladora apresentou o maior teor (44,25 mg dm⁻³), correspondendo a incrementos de 40,5% em relação ao plantio direto (31,50 mg dm⁻³) e de 90,3% em relação ao arado de aiveca + grade niveladora (23,25 mg dm⁻³). A grade niveladora isolada apresentou valor 21,4% superior ao plantio direto (Figura 21).

Na camada intermediária (0,15–0,30 m), o plantio direto apresentou o maior teor de fósforo (35,55 mg dm⁻³), sendo 53% superior à grade niveladora (23,25 mg dm⁻³) e 21,53% superior ao arado de aiveca + grade niveladora (29,25 mg dm⁻³). Na camada mais profunda (0,30–0,45 m), os teores variaram entre 23,75 e 30,25 mg dm⁻³, com diferenças inferiores a 27% entre os tratamentos (Figura 21).

Ainda no desdobramento da interação, verificou-se efeito dos sistemas de preparo dentro das profundidades. Foram observados maiores teores de fósforo na camada superficial nos preparos com grade intermediária + grade niveladora, subsolador de arrasto + grade niveladora e grade niveladora isolada. O preparo com arado de aiveca + grade niveladora e plantio direto não apresentaram variação entre as camadas avaliadas (Figura 21).

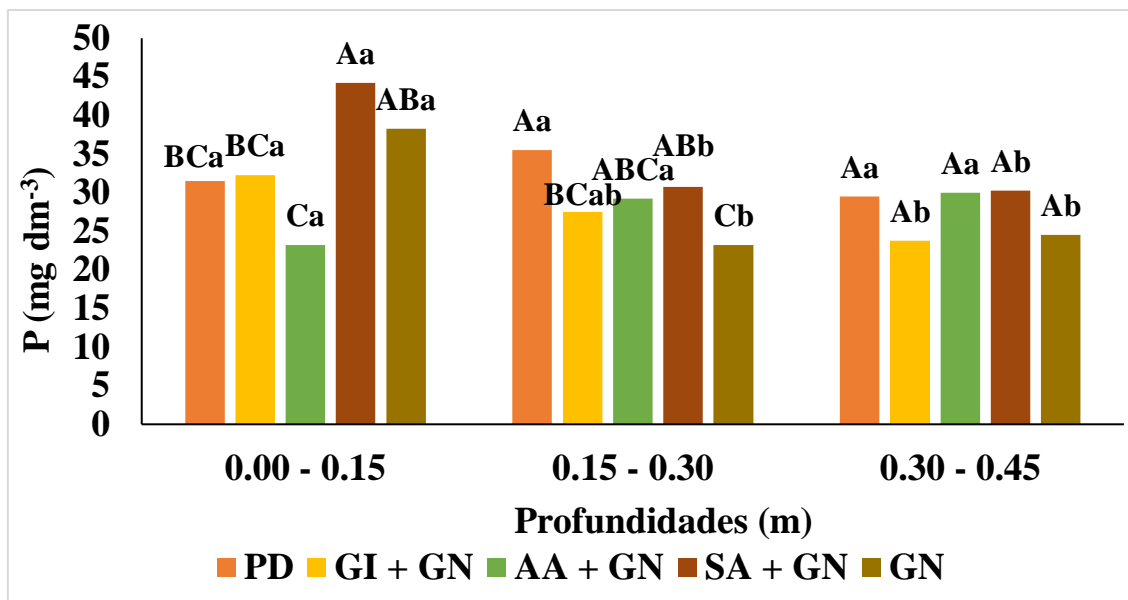


Figura 21. Fósforo (P) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Os teores de potássio variaram de 2,20 a 5,10 mmol_c dm⁻³. Na camada de 0,00–0,15 m, o arado de aiveca + grade niveladora apresentou o maior teor (5,00 mmol_c dm⁻³), correspondendo a um aumento de 62 % em relação ao plantio direto (3,10 mmol_c dm⁻³). O subsolador de arrasto + grade niveladora apresentou incremento intermediário (+40 %), enquanto a grade niveladora isolada reduziu o teor em 23 % em comparação ao plantio direto (Figura 22).

Na camada de 0,15–0,30 m (Figura 24), o plantio direto destacou-se com o maior valor (5,10 mmol_c dm⁻³), 104 % superior ao observado na grade niveladora (2,50 mmol_c dm⁻³) e 31 % maior que no subsolador de arrasto + grade niveladora (3,90 mmol_c dm⁻³). Na profundidade de 0,30–0,45 m (Figura 24), o subsolador de arrasto + grade niveladora apresentou teor de 4,62 mmol_c dm⁻³, representando um incremento de 5 % sobre o plantio direto (4,40 mmol_c dm⁻³) e mais que o dobro do observado no arado de aiveca + grade niveladora (2,20 mmol_c dm⁻³).

Os teores de potássio apresentaram comportamento homogêneo ao longo das profundidades nos sistemas com grade intermediária + grade niveladora, subsolador de arrasto + grade niveladora e grade niveladora isolada, não sendo observadas variações entre as camadas avaliadas.

No sistema plantio direto, verificou-se maior teor de K^+ na camada intermediária. Por sua vez, no preparo com arado de aiveca + grade niveladora, os maiores teores foram registrados nas camadas superficial e intermediária (Figura 22).

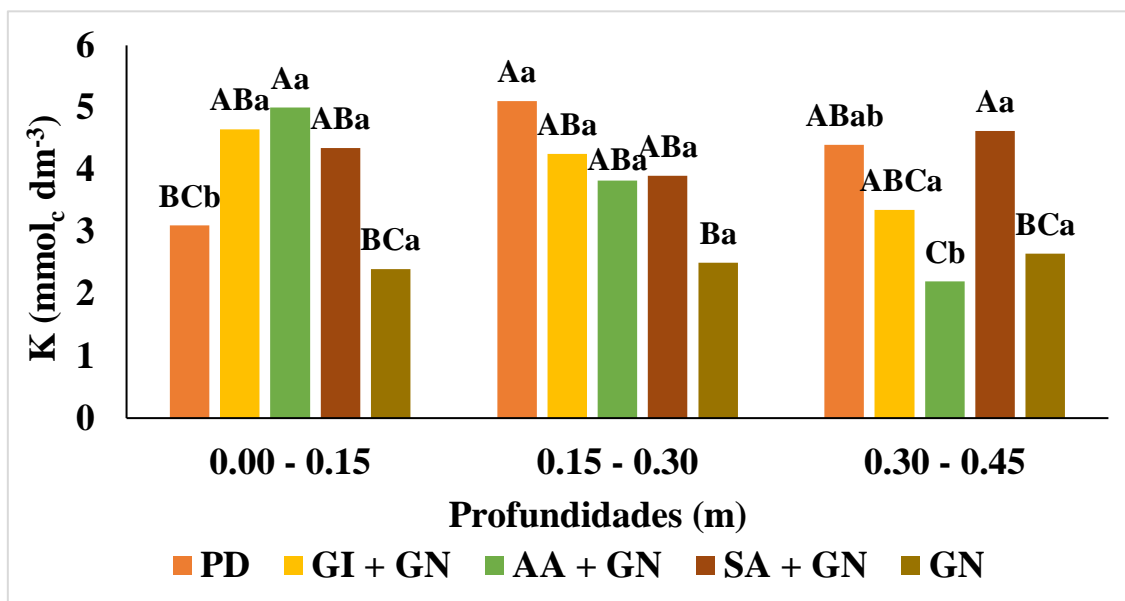


Figura 22. Potássio (K) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. PD – Plantio Direto; GI+GN – Grade Intermediária + Grade Niveladora; AA+GN – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; SA+GN – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; GN – Grade Niveladora.

Os valores de acidez potencial ($H + Al$) variaram entre 13,5 e 23,25 $mmolc\ dm^{-3}$. Na camada superficial (0,00–0,15 m), o tratamento Grade Intermediária + Grade Niveladora apresentou o maior valor de $H + Al$ (23,25 $mmolc\ dm^{-3}$), indicando maior acidez potencial nesse preparo (Figura 23).

Por outro lado, o Plantio Direto apresentou o menor valor (13,50 $mmolc\ dm^{-3}$), diferindo de todos os outros tratamentos, exceto ao preparo com a Grade Niveladora (15,50 $mmolc\ dm^{-3}$), o que evidencia menor mobilização de alumínio e hidrogênio trocáveis (Figura 23). Nas camadas mais profundas (0,15–0,30 e 0,30–0,45 m), as diferenças entre os preparos foram menores e não significativas (Figura 23).

O preparo com grade intermediária + grade niveladora foi o único sistema que apresentou variação significativa na acidez potencial ($H^+ + Al$) entre as camadas avaliadas, com maior valor observado na camada superficial (Figura 23).

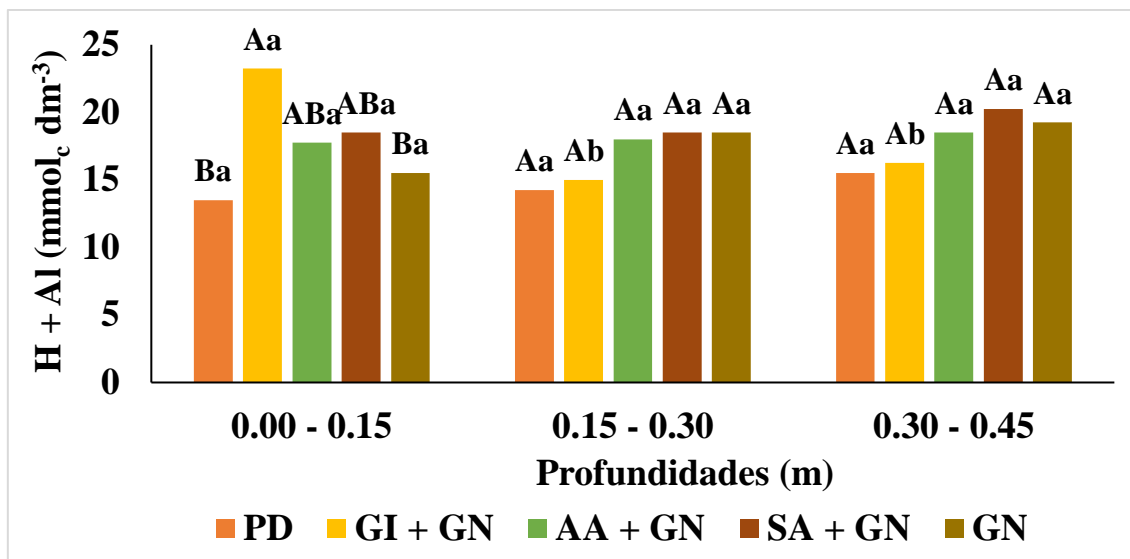


Figura 23. Acidez Potencial (H+Al) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Observou-se efeito dos sistemas de preparo do solo sobre a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V%) ($p \leq 0,05$) (Tabela 12).

Para o fator profundidade, houve diferença para SB, CTC e V% ($p \leq 0,05$). A interação entre preparos do solo e profundidades foi significativa para SB e CTC, não sendo verificada para V% (Tabela 12).

Tabela 12. Análise de variância para os atributos soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SB (F)	CTC (F)	V% (F)
Preparos do solo	4	16,449*	16,584*	9,838*
Profundidades	2	9,009*	12,164*	3,588*
Preparos × Profundidades	8	2,619*	7,827*	0,432 ^{ns}
Blocos	3	1,397 ^{ns}	1,963 ^{ns}	4,359*
Erro	42			

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 18,11 (SB); 8,82 (CTC) e 9,94 (V%).

A soma de bases (SB) variou de 24,15 a 51,12 mmolc dm⁻³ ao longo dos sistemas de preparo e profundidades avaliadas. Na camada de 0,00–0,15 m, os maiores valores foram observados nos preparos com grade niveladora (51,12 mmolc dm⁻³) e grade intermediária + grade niveladora (45,10 mmolc dm⁻³), os quais não diferiram entre si e foram superiores aos sistemas com maior mobilização do solo (AA+GN) e ao preparo

com subsolador associado à mobilização superficial (SA+GN). O plantio direto apresentou valor elevado (44,25 mmolc dm⁻³), sem diferir dos tratamentos com maiores médias (Figura 24).

Os menores valores na camada superficial foram registrados no Arado de Aiveca + Grade Niveladora (26,42 mmolc dm⁻³) e no Subsolador + Grade Niveladora (26,72 mmolc dm⁻³), diferindo dos demais tratamentos (Figura 24).

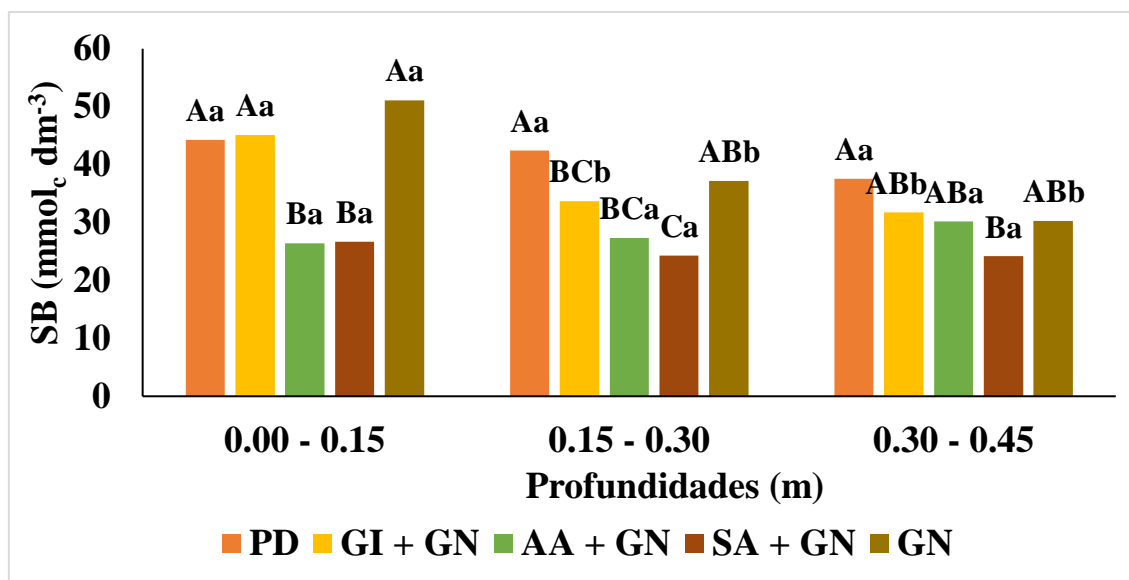


Figura 24. Soma de Bases (SB) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. PD – Plantio Direto; GI+GN – Grade Intermediária + Grade Niveladora; AA+GN – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; SA+GN – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; GN – Grade Niveladora.

Na camada de 0,15–0,30 m, houve redução nos teores de SB na maioria dos sistemas, exceto no AA+GN. O plantio direto apresentou a maior média (42,45 mmolc dm⁻³), seguido pela grade niveladora (37,15 mmolc dm⁻³), enquanto o menor valor foi observado no subsolador (24,25 mmolc dm⁻³), diferindo do plantio direto (Figura 24).

Na profundidade de 0,30–0,45 m, o plantio direto manteve os maiores valores de SB (37,50 mmolc dm⁻³), sendo superior ao subsolador (24,15 mmolc dm⁻³) e equivalente aos demais tratamentos (Figura 24).

As grades, tanto a niveladora isolada quanto em associação com a grade intermediária, apresentaram variação na soma de bases ao longo das camadas, com maiores valores observados na camada superficial.

A capacidade de troca catiônica (CTC) variou de 44,42 a 69,25 mmolc dm⁻³ (Figura 25). Na camada de 0,00–0,15 m, a grade niveladora apresentou o maior valor

(69,25 mmolc dm⁻³), sendo superior ao plantio direto (58,12 mmolc dm⁻³) e ao arado de aiveca + grade niveladora (44,42 mmolc dm⁻³). Os preparos com grade intermediária + grade niveladora (65,15 mmolc dm⁻³) e subsolador + grade niveladora (64,65 mmolc dm⁻³) não diferiram do maior valor observado.

Na camada de 0,15–0,30 m, a grade intermediária + grade niveladora apresentou a maior média (64,40 mmolc dm⁻³), semelhante ao plantio direto (61,82 mmolc dm⁻³) e superior aos tratamentos com arado de aiveca + grade niveladora (45,15 mmolc dm⁻³), subsolador + grade niveladora (47,32 mmolc dm⁻³) e grade niveladora (48,10 mmolc dm⁻³).

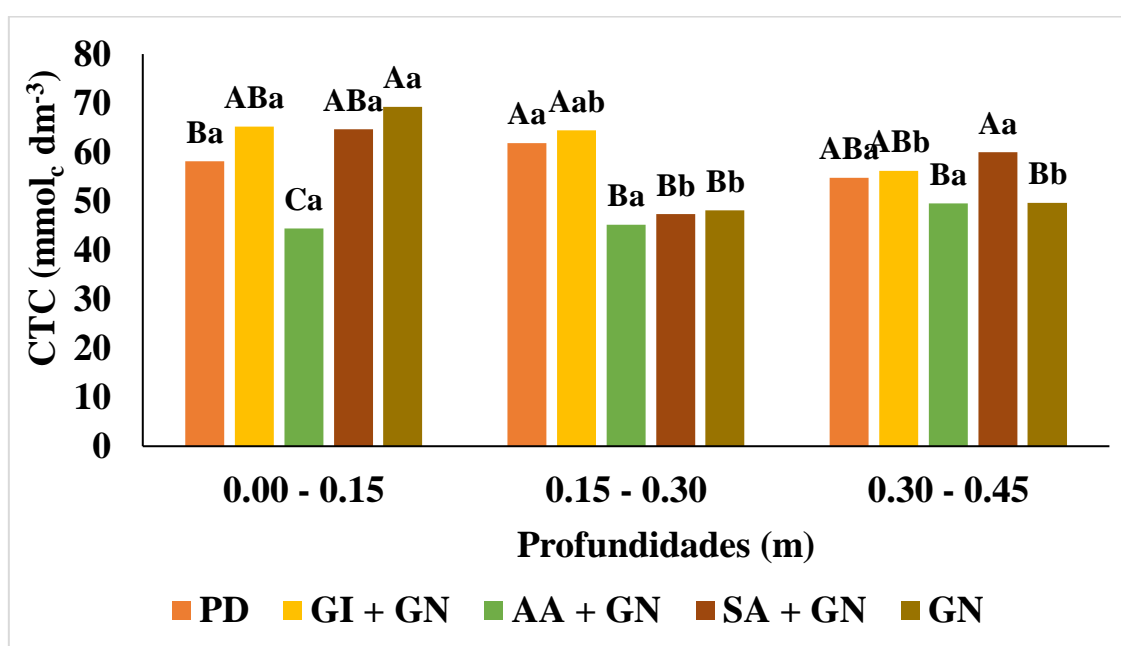


Figura 25. Capacidade da Troca Catiônica (CTC) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Na profundidade de 0,30–0,45 m, os valores da CTC variaram entre 49,52 e 59,95 mmolc dm⁻³, com maior valor observado no tratamento com subsolador + grade niveladora (59,95 mmolc dm⁻³) (Figura 25). A grade niveladora, isolada ou associada a GI, apresentou maiores valores da CTC na camada superficial.

Os valores de saturação por bases (V%) oscilaram entre 57,5 % e 76,0 %. Entre os preparos avaliados, o Plantio Direto (73,2 %) e a Grade Intermediária + Grade Niveladora (71,7 %) apresentaram os maiores valores de V%, sem diferença estatística entre si, e superiores aos Arado de Aiveca + Grade Niveladora (59,6 %) e o Subsolador

+ Grade Niveladora (61,7 %), os quais mostraram valores significativamente menores, indicando menor saturação por bases nessas condições de preparo. A Grade Niveladora isolada (66,3 %) apresentou resultado intermediário, sem diferença significativa em relação aos preparos superiores e inferiores (Figura 26A).

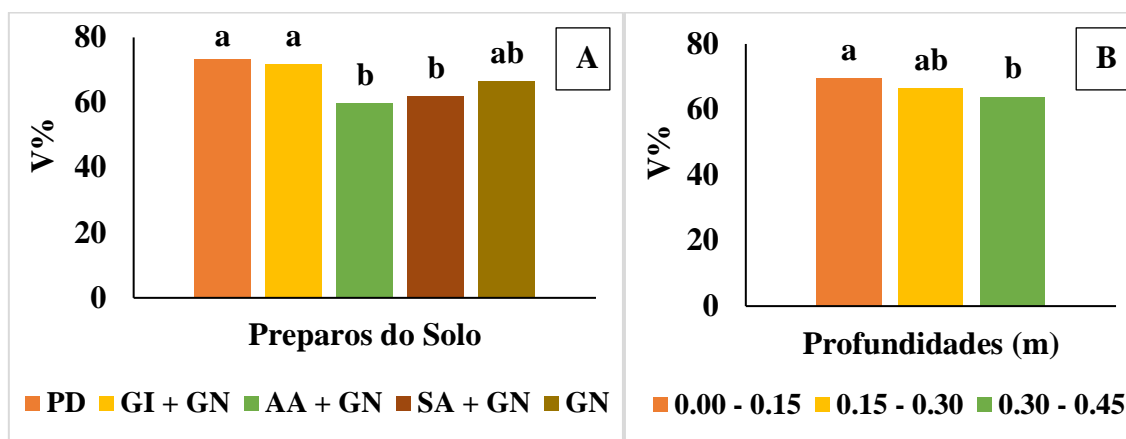


Figura 26. Saturação por Bases (V%) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Na comparação entre profundidades, observou-se redução gradual da saturação por bases com o aumento da profundidade. As médias foram de 69,4 % na camada de 0,00–0,15 m, 66,4 % em 0,15–0,30 m e 63,8 % em 0,30–0,45 m, sendo a camada mais superficial estatisticamente superior à mais profunda (Figura 26B).

4.2.3 Condutividade Elétrica do Solo

Não foi observado efeito dos sistemas de preparo do solo, das profundidades e da interação entre esses fatores sobre a condutividade elétrica (CE) ($p > 0,05$) (Tabela 13). O efeito de blocos foi significativo ($p \leq 0,05$) e o coeficiente de variação foi de 33,87%.

Tabela 13. Análise de variância para a condutividade elétrica (CE) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	RP (F)
Preparos do solo	4	0,373 ^{ns}
Profundidades	2	0,237 ^{ns}
Preparos × Profundidades	8	0,952 ^{ns}
Blocos	3	5,357 [*]
Erro	42	

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 33,87 (CE).

Os valores de CE variaram entre 0,22 e 0,42 dS m⁻¹, com alta variabilidade.

4.3 Indicadores Microbiológicos

4.3.1 Carbono da biomassa microbiana do solo

A análise de variância indicou que o carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) foi influenciado pelos sistemas de preparo do solo e pelas profundidades avaliadas ($p \leq 0,05$), sem efeito significativo da interação entre esses fatores (Tabela 14). O efeito de blocos também foi significativo, enquanto o coeficiente de variação foi de 11,18%.

Tabela 14. Análise de variância para o carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	CBMS (F)
Preparos do solo	4	5,466*
Profundidades	2	36,298*
Preparos × Profundidades	8	1,229 ^{ns}
Blocos	3	15,134*
Erro	42	

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 11,18 (CBMS).

Os valores médios de CBMS variaram de 239,58 a 289,83, com diferença entre os sistemas de preparo. Os maiores valores foram observados nos preparos com arado de aiveca + grade niveladora, subsolador + grade niveladora e grade niveladora (275,58; 289,16; e 289,83, respectivamente), os quais diferiram da grade intermediária + grade niveladora (239,58). O plantio direto apresentou valor intermediário (268,08), sem diferir dos manejos com maiores médias (Figura 27A).

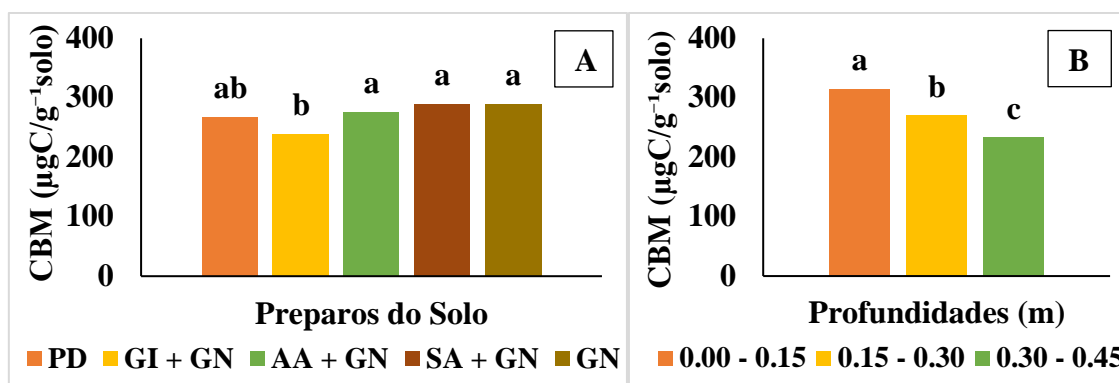


Figura 27. Carbono da biomassa microbiana (CBM) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Em relação à profundidade, a camada de 0,00–0,15 m apresentou o maior valor médio (314,95), diferindo das camadas de 0,15–0,30 m (269,35) e 0,30–0,45 m (233,05). Observou-se redução de 26,0% entre a camada superficial e a mais profunda, evidenciando decréscimo do CBMS com o aumento da profundidade (Figura 27B).

4.3.2 Respiração Basal

A análise de variância revelou efeito significativo ($p < 0,05$) apenas para o fator profundidade do solo sobre a respiração basal (RB), não havendo efeito dos sistemas preparo e nem da interação entre preparo *versus* profundidade (Tabela 15).

Tabela 15. Análise de variância para a respiração basal (RB) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades de avaliação.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	RB (F)
Preparos do solo	4	1,826 ^{ns}
Profundidades	2	113,261*
Preparos × Profundidades	8	0,796 ^{ns}
Blocos	3	4,344*
Erro	42	

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 17,07 (RB).

Os valores médios de respiração basal variaram de 15,16 a 18,16 entre os sistemas de preparo (Figura 28A). Em relação à profundidade, os maiores valores foram observados na camada de 0,00–0,15 m (24,85), superiores às camadas de 0,15–0,30 m (13,55) e 0,30–0,45 m (12,40), que não diferiram entre si (Figura 28B).

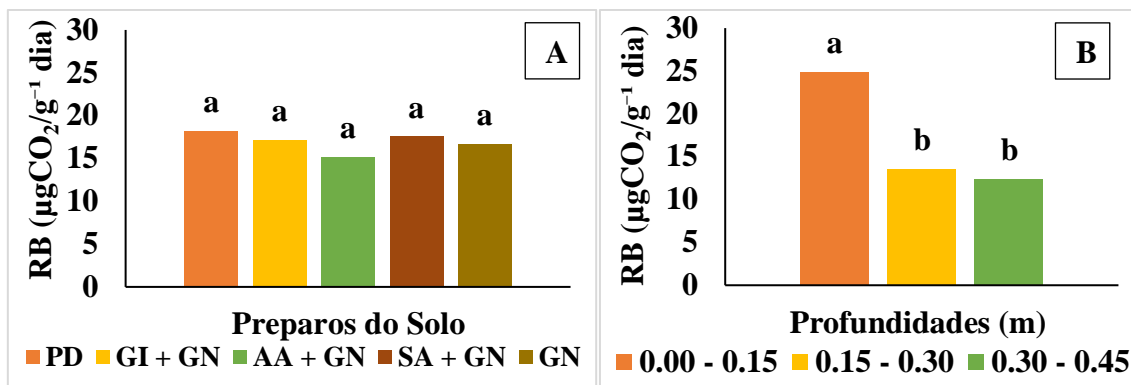


Figura 28. Respiração basal (RB) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.3.3 Quociente metabólico e quociente microbiano

O quociente metabólico (qCO_2) e o quociente microbiano ($qMic$) foram influenciados pelos sistemas de preparo do solo e pelas profundidades avaliadas ($p \leq 0,05$) (Tabela 16). A interação entre os fatores não foi significativa para Q_{met} , mas apresentou efeito para Q_{mic} . O efeito de blocos também foi significativo, com coeficientes de variação de 16,52% e 13,40% para qCO_2 e $qMic$, respectivamente.

Tabela 16. Análise de variância para o quociente metabólico (qCO_2) e o quociente microbiano ($qMic$) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	qCO_2 (F)	$qMic$ (F)
Preparos do solo	4	5,114*	6,168*
Profundidades	2	49,941*	17,371*
Preparos × Profundidades	8	1,115 ^{ns}	2,410*
Blocos	3	11,111*	8,630*
Erro	42		

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 16,52 (qCO_2); e 13,40 ($qMic$).

Os valores médios do quociente metabólico (qCO_2) variaram de 0,05 a 0,07. O maior valor foi observado na grade intermediária + grade niveladora (0,07), diferindo estatisticamente dos preparos com arado de aiveca + grade niveladora (0,05) e grade niveladora (0,05). O plantio direto (0,06) e o subsolador de arrasto + grade niveladora (0,06) apresentaram valores intermediários, sem diferirem dos demais (Figura 29A).

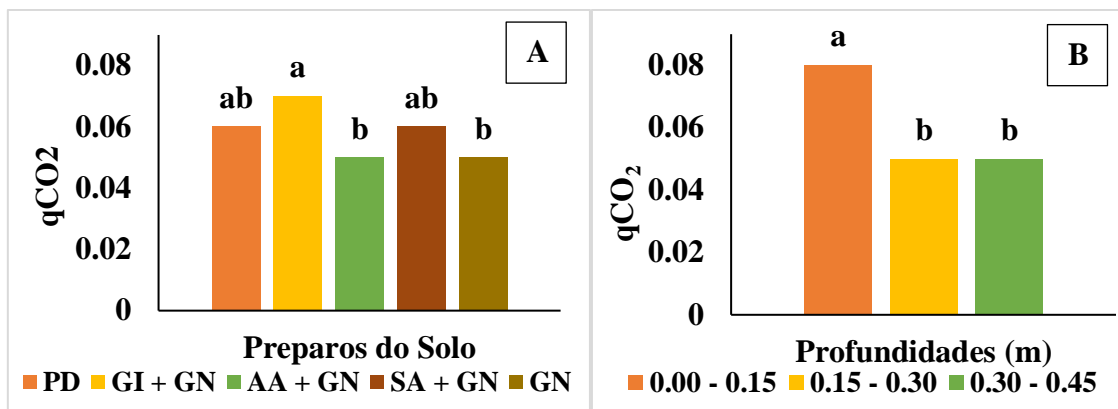


Figura 29. Quociente metabólico (qCO_2) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo (A) e das profundidades (B). Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

O maior valor médio de qCO_2 foi registrado na camada de 0,00–0,15 m (0,08), diferindo das camadas de 0,15–0,30 m (0,05) e 0,30–0,45 m (0,05).

O maior valor de $qMic$ na camada superficial foi observado no preparo arado de aiveca + grade niveladora (3,15%), que se superou aos menores valores registrados no subsolador de arrasto+ grade niveladora (2,36%) e grade intermediária + grade niveladora (2,47%). O plantio direto (2,72%) e a grade niveladora (2,80%) apresentaram valores intermediários (Figura 30).

Na camada intermediária, os maiores valores ocorreram no subsolador de arrasto + grade niveladora (3,10%) e no arado de aiveca + grade niveladora (2,91%), que formaram o grupo superior. Em contraste, os menores valores foram registrados no plantio direto (2,22%) e na grade intermediária + grade niveladora (2,16%). A grade niveladora manteve posição intermediária (2,69%).

Na camada mais profunda, os valores de $qMic$ variaram de 1,98 a 2,41%, com ausência de diferenças entre os preparos (Figura 30).

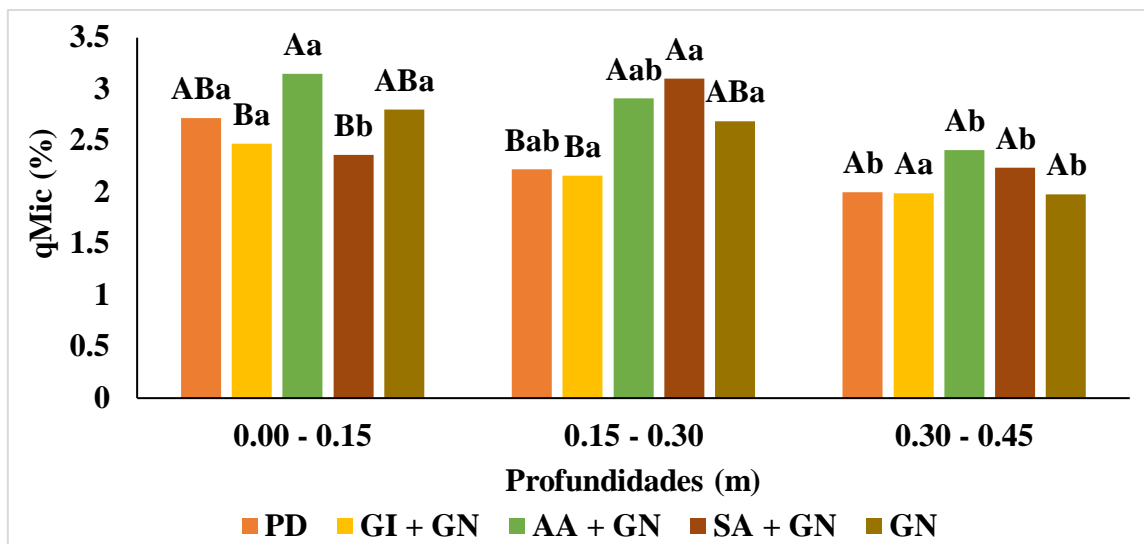


Figura 30. Quociente microbiano (qMic) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Em relação ao comportamento os preparos frente a profundidade, verificou-se que no plantio direto e na grade intermediária + grade niveladora, o qMic foi maior na camada superficial e diminuiu em profundidade, indicando redução da biomassa microbiana com o afastamento da superfície. No arado de aiveca + grade niveladora também houve queda do qMic ao longo do perfil. No subsolador, o qMic apresentou pico na camada intermediária (0,15–0,30 m), diferindo das demais profundidades, o que reflete o efeito da descompactação nessa profundidade (Figura 30).

Enquanto, na grade niveladora, o comportamento foi semelhante ao do sistema conservacionista, com valores maiores na superfície e redução na camada mais profunda. De forma geral, os tratamentos mostraram tendência predominante de decréscimo do qMic com a profundidade, com exceção do subsolador, que apresentou maior atividade microbiana na camada intermediária, já a grade intermediária + grade niveladora, embora apresente leve redução numérica em profundidade, não apresentou diferenças significativas entre as camadas (Figura 30).

4.3.4 Atividades Enzimáticas

As atividades enzimáticas da fosfatase ácida (ACP), arilsulfatase (ARS) e β -glicosidase (BG) variaram em função da profundidade do solo e da interação entre

preparo e profundidade ($p \leq 0,05$), sem efeito dos sistemas de preparo quando avaliados isoladamente (Tabela 17).

Tabela 17. Análise de variância para os atributos fosfatase ácida (ACP), arilsulfatase (ARS) e beta-glicosidase (BG) em função dos sistemas de preparos do solo e profundidades.

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	ACP (F)	ARS (F)	BG (F)
Preparos do solo	4	2,243 ^{ns}	2,366 ^{ns}	0,968 ^{ns}
Profundidades	2	138,351 [*]	294,716 [*]	394,396 [*]
Preparos × Profundidades	8	4,839 [*]	2,822 [*]	3,558 [*]
Blocos	3	1,516 ^{ns}	4,534 [*]	5,140 [*]
Erro	42			

GL: graus de liberdade; F: valor do teste F; ns: não significativo; * $p \leq 0,05$; CV (%): 8,86 (ACP); 15,39 (ARS) e 14,96 (BG).

4.3.4.1 Fosfatase Ácida

Na camada de 0,00–0,15 m, a atividade da fosfatase ácida (ACP) variou de 154,09 a 203,55 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. A grade niveladora apresentou o maior valor (203,55 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), diferindo dos demais preparos, exceto do subsolador de arrasto (186,48 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), que apresentou valor intermediário. O plantio direto registrou a menor atividade (154,09 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) (Figura 31).

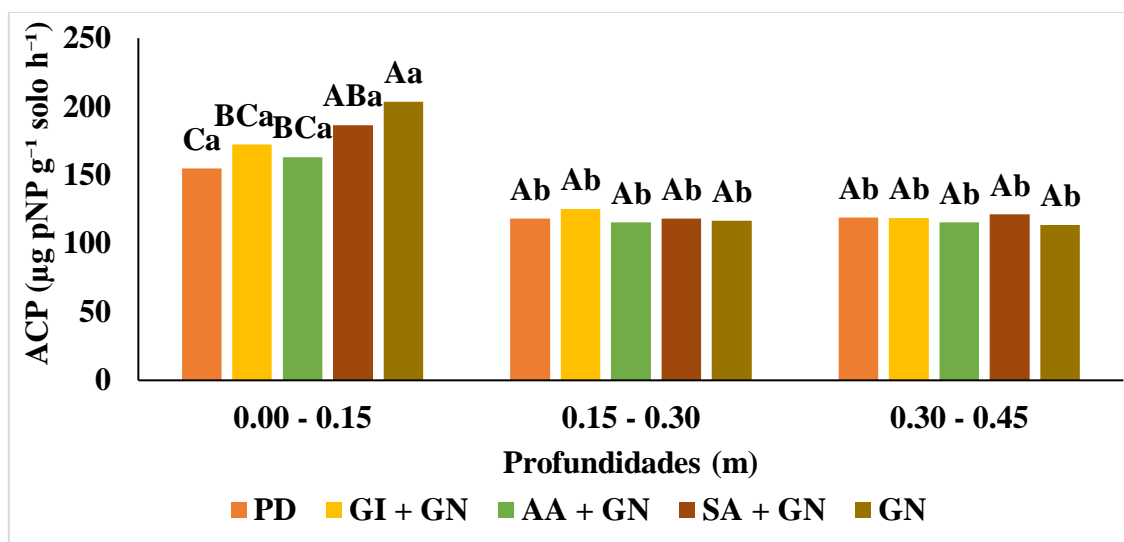


Figura 31. Enzima fosfatase ácida (ACP) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Nas camadas de 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m, não foram observadas diferenças entre os sistemas de preparo. Entretanto, em ambas as profundidades, os valores de ACP foram inferiores aos verificados na camada superficial (Figura 31).

4.3.4.2 Arilsulfatase

A atividade da arilsulfatase (ARS) na camada superficial (0,00–0,15 m) variou de 46,31 a 61,07 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, com maiores valores observados nos sistemas com grade niveladora e plantio direto (Figura 32). Nas camadas subsuperficiais, houve redução acentuada da atividade enzimática em todos os sistemas de preparo, com valores inferiores a 20 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na profundidade de 0,30–0,45 m.

A interação entre preparo do solo e profundidade evidencia um padrão consistente de decréscimo da atividade da ARS com o aumento da profundidade, independentemente do sistema de manejo, com maior atividade concentrada na camada superficial do solo.

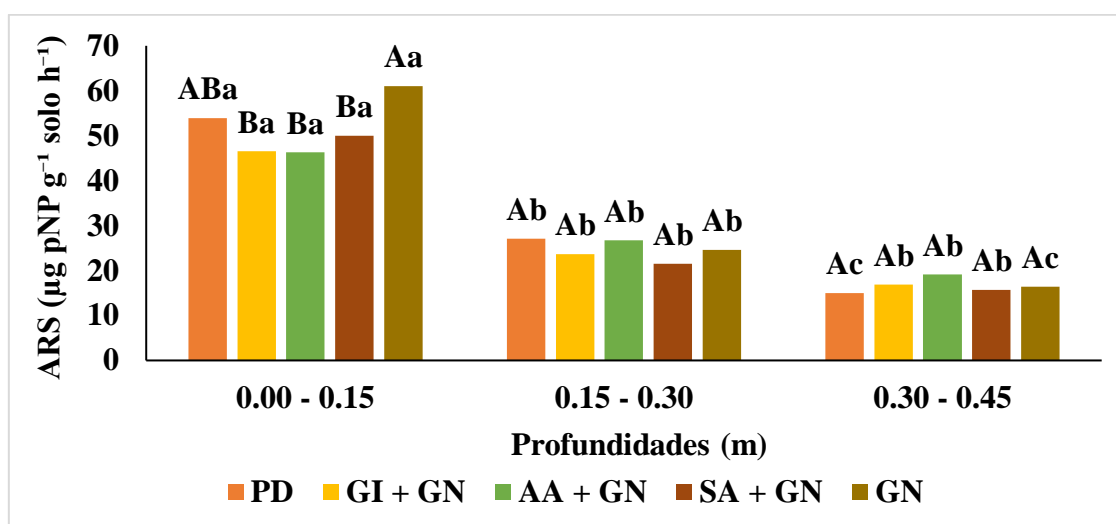


Figura 32. Enzima arilsulfatase (ARS) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arraste + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.3.4.3 Beta - Glicosidase

A atividade da β -glicosidase (BG) na camada superficial (0,00–0,15 m) variou de 48,99 a 60,43 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, com maior valor observado no sistema de plantio direto e menor no arado de aiveca (Figura 33).

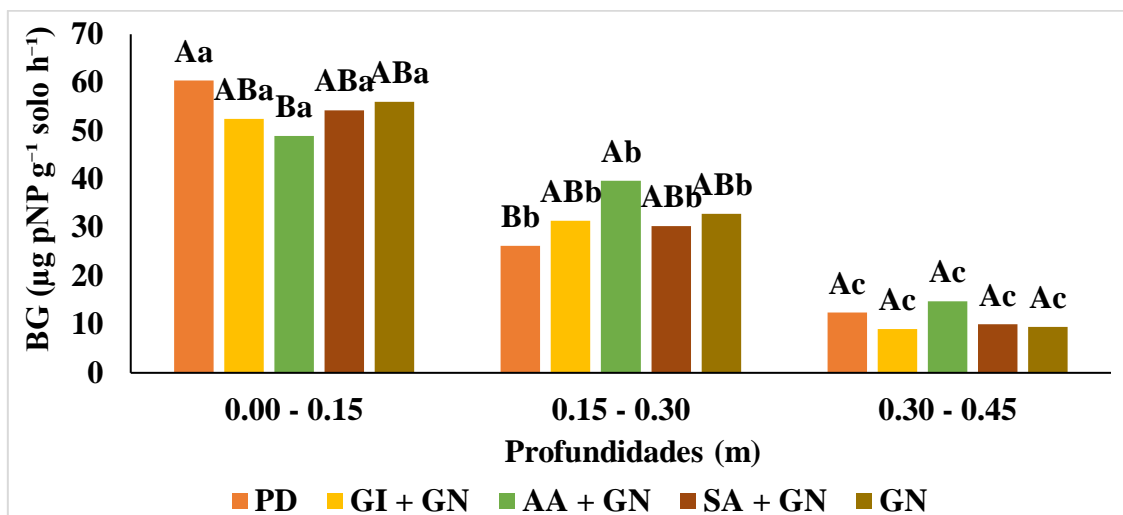


Figura 33. Enzima beta-glicosidase (BG) do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar em função dos tipos de preparo do solo e das profundidades. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas, as profundidades dentro do mesmo tratamento. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

Na camada intermediária (0,15–0,30 m), verificou-se inversão desse padrão, com maior atividade no arado de aiveca e menor no plantio direto. Na profundidade de 0,30–0,45 m, houve redução acentuada da atividade enzimática, sem diferenças significativas entre os manejos, com valores mínimos próximos a 9,02 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Figura 33).

Havendo decréscimo consistente da atividade da BG ao longo do perfil, com maiores valores concentrados na camada superficial, independentemente do sistema de manejo.

4.4 Produtividade

Os resultados deste estudo indicaram que os diferentes sistemas de manejo do solo testados não geraram diferenças significativas na produtividade dos colmos da cana-de-açúcar nas duas safras (Figura 34).

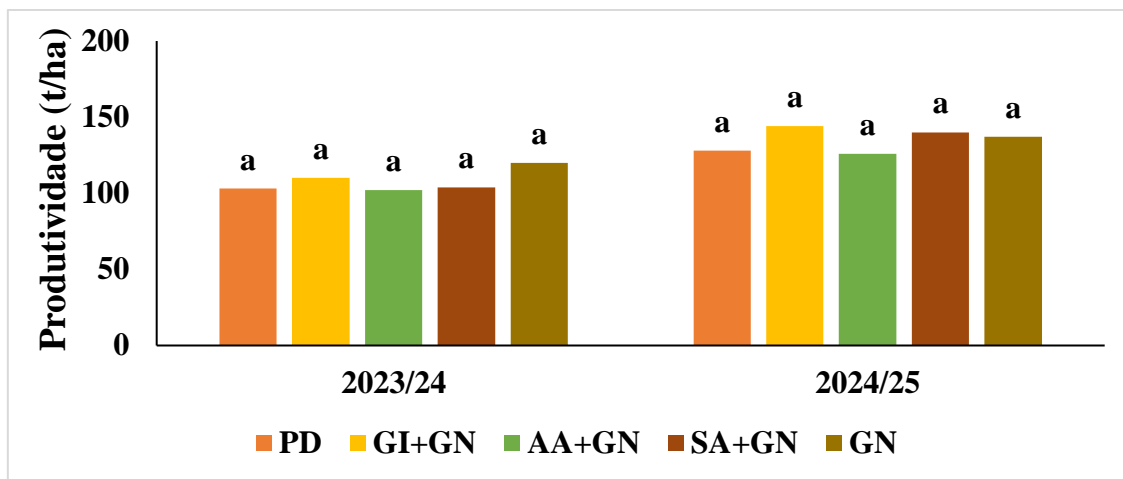


Figura 34. Produtividade da cana-de-açúcar cultivada no Latossolo Vermelho Distrófico em função dos tipos de preparo de solo nas safras 2023/24 (A) e 2024/25 (B). Médias com letras iguais comparando os tratamentos em cada profundidade não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%. *PD* – Plantio Direto; *GI+GN* – Grade Intermediária + Grade Niveladora; *AA+GN* – Arado de Aiveca + Grade Niveladora; *SA+GN* – Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e; *GN* – Grade Niveladora.

4.5 Análise integrada das correlações entre atributos físicos, químicos e biológicos do solo

A matriz de correlação revelou um padrão consistente de associações entre os atributos avaliados, com magnitudes variando de fracas a fortes, conforme os critérios de Cohen (Figura 35).

Entre as relações de maior intensidade, destacam-se as correlações positivas entre ACP e ARS ($r = 0,90$), ARS e BG ($r = 0,90$), e ACP e BG ($r = 0,78$), indicando forte relação entre essas variáveis, sugerindo que tais atributos respondem de maneira semelhante a um mesmo conjunto de fatores edáficos.

Da mesma forma, a CTC apresentou correlações positivas expressivas com COS ($r = 0,59$) e SB ($r = 0,52$), evidenciando a contribuição da matéria orgânica e das bases trocáveis para a capacidade de troca catiônica.

Correlações de magnitude moderada foram observadas entre qCO_2 e CTC ($r = 0,41$), qCO_2 e P ($r = 0,36$), COS e P ($r = 0,41$), e RP e SB ($r = 0,43$), apontando para interações relevantes entre atributos químicos e físicos do solo.

Em contrapartida, foram observadas relações negativas entre MACRO e RP ($r = -0,76$), caracterizando uma forte associação inversa, além de MACRO com DS ($r = -0,37$) e $qMic$ com COS ($r = -0,40$), ambas de magnitude moderada, o que sugere efeitos antagônicos entre componentes estruturais e biológicos.

A maioria das demais combinações apresentou correlações fracas ($r < 0,30$), indicando baixa associação linear entre os atributos, como observado para $qMic$ e pH ($r = -0,09$) e CE e ACP ($r = 0,01$). Esse padrão sugere relativa independência entre parte das variáveis, possivelmente refletindo a complexidade dos processos que governam o sistema.

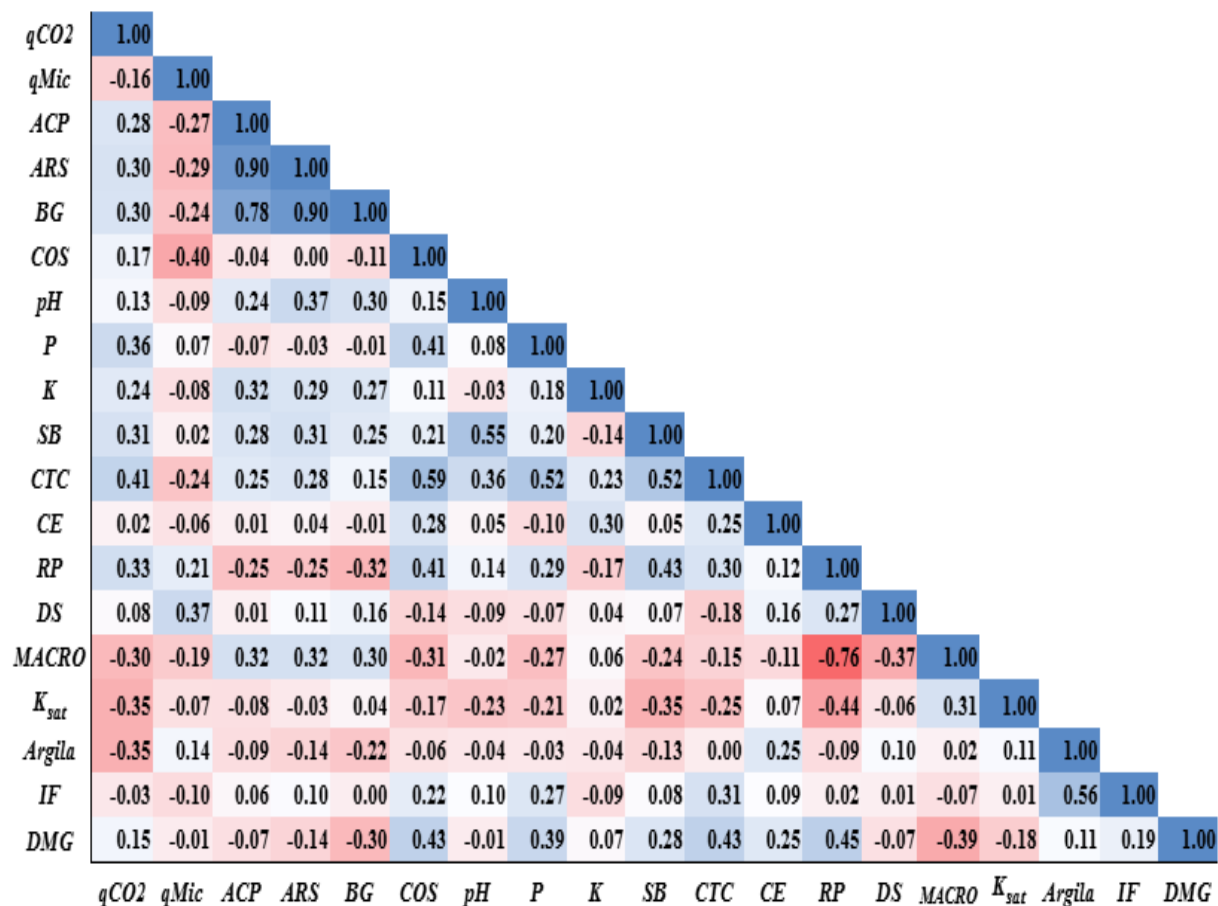


Figura 35. Matriz de correlação de Pearson entre atributos físicos, químicos e biológicos do solo. As cores indicam a intensidade e o sentido das correlações (azul = negativa; vermelho = positiva) e os valores numéricos correspondem aos coeficientes de correlação (r).

5. DISCUSSÃO

O aumento da argila dispersa em água (ADA) reflete uma condição de instabilidade estrutural, favorecendo processos como selamento superficial, redução da infiltração de água e maior suscetibilidade à erosão hídrica. No entanto, a ADA representa um indicador de potencial de degradação física, não caracterizando isoladamente a ocorrência de erosão, a qual depende também de fatores como intensidade das chuvas, declividade e cobertura vegetal. Por outro lado, menores valores de ADA indicam maior coesão entre partículas e maior estabilidade dos agregados, reduzindo a vulnerabilidade à desagregação (Bertol et al., 2014; Seben Junior, Corá e Lal, 2014).

O índice de flocculação expressa a proporção da fração argila que se encontra agregada, sendo, portanto, um indicador da estabilidade estrutural do solo. Nesse contexto, os resultados evidenciaram que sistemas com maior mobilização, como o preparo com arado de aiveca + grade niveladora, apresentaram menor índice de flocculação e maior dispersão das partículas de argila.

Esse comportamento está associado à ruptura mecânica dos agregados e à redução dos agentes cimentantes, resultando em menor estabilidade estrutural (Fontana et al., 2010; Silva et al., 2014). O revolvimento intenso promove a fragmentação do solo, refletindo na redução do índice de flocculação, bem como na redução do diâmetro médio geométrico e ponderado dos agregados (Segnini et al., 2013; Tenelli et al., 2019).

O diâmetro médio geométrico (DMG), indicador do tamanho mais frequente dos agregados (Soares et al., 2018), evidenciou que a influência dos sistemas de preparo é mais pronunciada na camada superficial. Observa-se que o preparo com grade niveladora promoveu a formação de agregados maiores e mais estáveis na superfície em comparação às camadas mais profundas do perfil, o que se relaciona à sua atuação mais restrita às camadas superficiais do solo, enquanto o arado de aiveca promove mobilização em maiores profundidades.

O diâmetro médio ponderado (DMP), por sua vez, representa a distribuição dos agregados nas diferentes classes de tamanho, sendo obtido pela ponderação do diâmetro médio das classes pela massa de solo retida em cada uma delas, aumentando com a maior proporção de agregados de maior tamanho (Villa; França Junior, 2017). Assim, sistemas com menor intensidade de revolvimento tendem a apresentar maiores valores de DMP, refletindo maior proporção de agregados estáveis.

A menor mobilização do solo também está associada à manutenção da matéria orgânica e à maior presença de resíduos vegetais na superfície, contribuindo para a formação e estabilização dos agregados (Zhang et al., 2022). Estudos demonstram que a estabilidade dos agregados na camada superficial está diretamente relacionada ao teor de matéria orgânica, sendo maior em sistemas com maior aporte de resíduos (Vasconcelos et al., 2010; De Vares Rossetti et al., 2014).

Nesses sistemas, a interação entre maior teor de matéria orgânica e menor grau de compactação favorece a formação de agregados mais estáveis, enquanto a compactação exerce efeito oposto, reduzindo a porosidade e comprometendo a estrutura do solo (De Vares Rossetti et al., 2014).

Adicionalmente, a menor intensidade de revolvimento reduz a oxidação da matéria orgânica, contribuindo para a manutenção dos teores de carbono no solo e menor emissão de CO₂ para a atmosfera (Foley et al., 2005). O aumento do tempo de adoção de sistemas conservacionistas promove o acúmulo de carbono em frações mais estáveis, como a humina, diretamente associadas à formação e manutenção dos agregados (Rossetti et al., 2016).

Dessa forma, os resultados indicam que sistemas de preparo com menor mobilização do solo, como grade niveladora, subsolador de arrasto + grade niveladora e plantio direto, favorecem a estabilidade estrutural, promovendo maior agregação, menor dispersão da argila e maior resistência à degradação ao longo do tempo.

As alterações na estrutura do solo também se refletem no comportamento hidráulico, especialmente na condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), a qual está diretamente relacionada à continuidade e à distribuição dos poros no solo (Pinheiro et al., 2018).

Os diferentes sistemas de preparo do solo não promoveram alterações suficientes para provocar efeito na condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), independentemente da profundidade de avaliação. Os valores observados foram classificados como lentos a moderadamente lentos, conforme a classificação proposta por Reichardt (1978), que considera condutividades entre 1 e 5 mm h⁻¹ como lentas e entre 5 e 20 mm h⁻¹ como moderadamente lentas.

A variabilidade dos dados está associada à heterogeneidade intrínseca do solo, uma vez que a condutividade hidráulica apresenta elevada variabilidade espacial, podendo sofrer alterações mesmo diante de pequenas mudanças estruturais, o que exige

maior número de medições para sua adequada representação (Ferreira et al., 2022). Nesse sentido, Mesquita e Moraes (2004) destacam que os CVs associados aos métodos de determinação da condutividade hidráulica frequentemente ultrapassam 70%, reforçando a complexidade dessa propriedade.

Embora a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) não tenha diferido entre os tratamentos, a capacidade de campo (CC) apresentou efeito significativo apenas para a profundidade. A maior retenção de água observada na camada superficial pode ser atribuída, em parte, ao maior teor de matéria orgânica presente nessa profundidade. O carbono orgânico do solo (COS), atua na dinâmica hídrica, contribuindo para a formação de substâncias húmicas e promovendo a agregação do solo (Beck-Broichsitter et al., 2020).

A incorporação e estabilização do COS favorecem a formação de agregados estáveis e modificam a distribuição e conectividade dos poros, resultando em maior proporção de microporos responsáveis pela retenção de água em tensões matriciais mais elevadas (Celik et al., 2010; Beck-Broichsitter et al., 2020; Zhou et al., 2020; He et al., 2023; Hussain, Ravi; Garg, 2020). Parte do carbono orgânico encontra-se associada à fração mineral, formando complexos organominerais, que aumentam a estabilidade estrutural e a resistência mecânica do solo (Gao et al., 2024).

Essas interações favorecem a manutenção de agregados e o aumento de microporos intra-agregados, determinantes para a retenção hídrica. Conseqüentemente, a redução da CC com o aumento da profundidade observada neste estudo pode estar relacionada à diminuição do teor de matéria orgânica e à menor contribuição do carbono orgânico na estabilização estrutural e formação de microporos.

Em consonância, Reynolds et al. (2002) observaram ausência de diferenças significativas em CC e PMP entre sistemas de plantio direto e convencional, exceto em CC em um ambiente específico. Segundo esses autores, o PMP é determinado principalmente pelo teor de argila, pouco influenciado pelo manejo, enquanto a CC resulta da interação entre textura, densidade, estrutura e matéria orgânica, podendo alterações nesses fatores compensar-se mutuamente.

Além disso, a maior CC da camada superficial decorre da elevada área superficial da matéria orgânica e da presença de grupos funcionais hidrofílicos, como carboxilas e hidroxilas, que aumentam a afinidade pelas moléculas de água, favorecendo a adsorção e retenção hídrica nos microporos intra-agregados (Schroeder, 2017). Dessa forma, a

combinação de alto teor de matéria orgânica, grande área superficial e predominância de microporos torna a camada superficial mais eficiente na retenção de água.

A retenção de água observada na capacidade de campo está intimamente relacionada à estrutura do solo, especialmente à quantidade, distribuição e conectividade dos poros. Nesse contexto, a porosidade do solo, tanto total quanto distribuída entre macro e microporos, reflete diretamente os efeitos dos sistemas de manejo sobre a estrutura edáfica.

No presente estudo, os diferentes preparos de solo afetaram a distribuição e o tipo de poros, ainda que a porosidade total tenha se mantido relativamente constante ao longo do perfil. Entre os manejos, o plantio direto apresentou os menores valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade, comportamento semelhante ao observado para a grade niveladora, que também resultou em menor macroporosidade. Esse padrão é compatível com o maior acúmulo de tensões na superfície em áreas submetidas a tráfego contínuo de máquinas, típico em preparos com ou sem revolvimento, onde ocorre menor desagregação estrutural.

A macroporosidade do solo constitui um dos principais atributos físicos associados à dinâmica de aeração, à condução rápida de água e ao crescimento radicular. Valores críticos de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ têm sido tradicionalmente indicados como referência para assegurar condições adequadas ao desenvolvimento das plantas (Baver, 1949; Vomocil; Flocker, 1966; Grable; Siemer, 1968; Gupta; Allmaras, 1987), devendo, entretanto, ser interpretados considerando a textura, a estrutura e o histórico de manejo do solo (Reichert et al., 2009).

No presente estudo, a macroporosidade variou entre $0,061$ e $0,094 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre os sistemas de preparo e de $0,065$ a $0,091 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ao longo das profundidades, mantendo-se abaixo do limite crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Essa condição sugere restrição nos poros responsáveis pela aeração e escoamento rápido da água, configurando indícios de compactação estrutural, especialmente na superfície. A redução da macroporosidade implica maior predominância de microporos, favorecendo a retenção de água, mas podendo limitar a difusão de oxigênio e aumentar o risco de hipóxia em períodos de maior umidade (Reichert et al., 2009).

Quando considerada apenas a profundidade, observou-se que a porosidade total não variou entre camadas, enquanto a distribuição entre macro e microporos apresentou comportamento contrastante: macroporosidade menor na superfície e crescente com a

profundidade, e microporosidade situação inversa. Tal padrão indica que a compactação superficial decorrente do tráfego agrícola e do peso dos implementos reduz os poros maiores, aumentando a proporção de microporos, mesmo sem alterar o volume total de vazios.

Estudos de Esteban et al. (2019, 2020) demonstram que, a cada ciclo de cultivo, ocorre aumento da densidade e da microporosidade superficial devido à conversão de macroporos em microporos, reduzindo a aeração e a condução rápida da água na superfície. Observações similares foram relatadas por Lima et al. (2022), Alakukku (1996), Colombi et al. (2017) e Feng et al. (2019), reforçando que a compactação estrutural afeta sobretudo os macroporos, enquanto a microporosidade sofre alterações menores, especialmente em profundidade.

O incremento da macroporosidade em camadas mais profundas pode ser associado à presença de bioporos formados por raízes e fauna edáfica, além da menor pressão mecânica, preservando os poros estruturais. Por outro lado, os manejos com maior revolvimento tendem a aumentar a proporção de microporos na superfície devido à destruição parcial de macroporos e à compactação subsequente, enquanto a microporosidade diminui com a profundidade. Esse comportamento evidencia o efeito combinado do tráfego agrícola e do peso dos maquinários sobre a estrutura do solo.

As alterações na distribuição dos poros estão diretamente associadas ao grau de compactação do solo, o qual pode ser adequadamente avaliado por meio da densidade do solo. No presente estudo, os sistemas de preparo não influenciaram esse atributo, sendo observadas variações apenas em função da profundidade. Ressalta-se, contudo, que as amostras foram coletadas após a colheita da cana-soca, na linha de tráfego das máquinas, especificamente no centro da entrelinha, região mais suscetível à compactação. Dessa forma, a posição de amostragem pode ter contribuído para a homogeneização dos valores de densidade entre os tratamentos.

Esse comportamento é consistente com resultados reportados na literatura, nos quais não foram verificadas diferenças entre sistemas de preparo em determinadas condições do solo (Carefoot, Lindwall; Nyborg, 1990; Martínez et al., 2008). A variação observada ao longo do perfil, com maiores valores na camada superficial e redução em profundidade, pode ser atribuída à maior intensidade das tensões mecânicas próximas à superfície e à sua dissipação com o aumento da profundidade, além da maior presença de

poros estruturais formados pela atividade biológica e radicular nas camadas subsuperficiais.

A maior suscetibilidade da camada superficial à compactação tem sido amplamente relatada, sendo atribuída tanto às características intrínsecas do solo quanto à ação do tráfego mecanizado (Guimarães Júnnyor, 2018; Lamandé; Schjonning, 2011; Araújo Junior et al., 2011; Lozano et al., 2013; Mion et al., 2016; Schjonning et al., 2016). Nesse contexto, as tensões aplicadas pelos equipamentos agrícolas concentram-se nas camadas superficiais, reduzindo progressivamente em profundidade.

Os valores de densidade observados ao longo do perfil (1,71 a 1,77 Mg m⁻³) situam-se próximos ou acima do limite crítico de 1,70 Mg m⁻³ proposto para a cultura da cana-de-açúcar, com base no conceito de Faixa de Água Menos Limitante (FAML) (Imhoff et al., 2001). Esse limiar representa a condição em que o solo passa a restringir simultaneamente a aeração, a disponibilidade hídrica e a resistência mecânica à penetração, indicando um estado físico limitante ao desenvolvimento radicular.

A similaridade textural entre o solo avaliado por Imhoff et al. (2001) e o presente estudo confere robustez à comparação, uma vez que pequenas variações na fração argila não foram suficientes para reduzir os valores de densidade observados. Assim, a proximidade ou superação do limite crítico sugere que o solo se encontra em condição de compactação capaz de impor restrições ao crescimento radicular.

O aumento da densidade do solo está diretamente associado à elevação da resistência mecânica à penetração, podendo restringir o crescimento radicular e o desenvolvimento das plantas. No presente estudo, a resistência à penetração (RP) apresentou efeito dos sistemas de preparo e das profundidades avaliadas, sem interação entre os fatores, indicando respostas independentes desses componentes.

A interpretação desses resultados requer a compreensão da atuação dos implementos agrícolas sobre a estrutura do solo. O arado de aiveca, por operar em maiores profundidades, promove mobilização vertical mais intensa, sendo capaz de romper camadas compactadas ao longo do perfil, especialmente próximas a 0,45 m. Esse efeito contribui para a redução da resistência mecânica, justificando os menores valores observados nesse preparo.

Por outro lado, preparo de menor intensidade de mobilização, como a grade niveladora e o plantio sob a palhada (plantio direto), atuam predominantemente na superfície, sem promover descompactação em camadas mais profundas. Nessas

condições, o tráfego contínuo de máquinas ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, sobretudo durante a colheita mecanizada, tende a concentrar tensões abaixo da camada mobilizada, favorecendo a formação de zonas compactadas.

A ausência e a limitação da mobilização vertical, associada ao tráfego intensivo, explica os maiores valores de RP observados nesses sistemas, especialmente no preparo com a grade niveladora isolada.

No sistema plantio direto, a manutenção da cobertura vegetal e a ausência de revolvimento reduzem a desagregação do solo e limitam a redistribuição da porosidade, favorecendo o aumento gradual da densidade e da resistência mecânica, sobretudo nas camadas superficiais (Silva Junior et al., 2013; Arcoverde et al., 2019). Esse comportamento reflete uma reorganização estrutural progressiva, influenciada tanto pelo tráfego de máquinas quanto pela reorganização natural das partículas.

A maior resistência observada na camada superficial está diretamente relacionada à concentração das tensões aplicadas pelo tráfego mecanizado, que atuam com maior intensidade próximo ao ponto de contato dos pneus ou esteiras. Esse processo promove a redução da macroporosidade e o aumento relativo da microporosidade. Com o aumento da profundidade, ocorre dissipação dessas tensões, resultando na redução da densidade e, conseqüentemente, da resistência à penetração, além de um aumento relativo da macroporosidade. Esses comportamentos também foram averiguados nos estudos de Bergamin et al. (2010), Cabral et al. (2015) e Arcoverde (2018).

Para a interpretação dos valores de RP deve considerar os limites críticos estabelecidos para restrição ao crescimento radicular. Valores entre 3,0 e 4,0 MPa são frequentemente apontados como limitantes em diferentes sistemas de uso do solo (Giarola et al., 2007; Betioli Júnior et al., 2012; Guimarães et al., 2013; Baquero et al., 2012; Sá et al., 2016), sendo proposto para a cultura da cana-de-açúcar um limiar próximo de 4,0 MPa (Marasca et al., 2015; Oliveira Filho et al., 2015).

No entanto, os valores obtidos neste estudo permaneceram abaixo desse limite crítico, não configurando restrição mecânica ao desenvolvimento radicular. Ressalta-se, contudo, que as determinações foram realizadas em laboratório, sob condições de umidade controlada (10 kPa), o que tende a reduzir a resistência mecânica em relação às condições de campo.

De forma integrada, os resultados evidenciam que o preparo com grade niveladora promoveu alterações estruturais, caracterizado por menor macroporosidade, maior

microporosidade e maior resistência à penetração, mesmo sem alterações expressivas na densidade do solo. Esse comportamento indica reorganização estrutural com fechamento de poros maiores e aumento de poros intra-agregados, conforme descrito por Esteban et al. (2019; 2020).

A similaridade nos valores de F observada para COS e EstC decorre da dependência matemática entre essas variáveis, uma vez que o EstC é diretamente derivado do COS.

Em vícios, observou-se que o arado de aiveca + grade niveladora apresentou maior uniformidade dos teores de carbono orgânico (COS) entre as profundidades avaliadas, o que indica menor diferença vertical no conteúdo de carbono. Essa estabilidade relativa pode ser atribuída ao maior revolvimento e inversão das camadas do solo promovidos por esse tipo de preparo.

O arado de aiveca realiza o tombamento completo do solo, misturando a camada superficial, mais rica em matéria orgânica, com as camadas inferiores. Esse processo resulta em uma distribuição mais homogênea do carbono orgânico ao longo do perfil, refletindo a redistribuição da matéria orgânica entre as camadas do solo. No entanto, apesar dessa aparente uniformidade, tal preparo não implica em acúmulo de MOS, mas sim em diluição e redistribuição do carbono orgânico em todo o perfil.

Verifica-se também uma tendência de maiores teores nas camadas superficial e profunda, e menor teor na camada intermediária, tanto no preparo com subsolador + grade niveladora quanto na grade niveladora isolada, essa tendência ocorre devido a forma de atuação dos implementos e pela distribuição natural dos resíduos e raízes no perfil do solo.

A grade niveladora isolada atua de forma superficial, promovendo apenas o destorroamento e incorporação leve dos resíduos vegetais, o que favorece o acúmulo de MOS na superfície, ao mesmo tempo que garante a preservação COS em maiores profundidades, devido a menor perturbação estrutural que o preparo proporciona ao meio edáfico.

Por outro lado, o subsolador de arrasto, quando utilizado, realiza o rompimento do solo em profundidade sem promover mistura entre as camadas, o que aumenta a porosidade e a infiltração de água, estimulando o crescimento radicular mais profundo e a liberação de exsudatos radiculares ricos em compostos orgânicos. Dessa forma, ocorre maior acúmulo, de carbono (C), nas camadas mais profundas, refletindo o efeito indireto

da atividade radicular e da melhoria das condições físicas do solo (Yang et al., 2022; Shukla et al., 2020).

E por fim, no plantio direto, observou-se valor intermediário do carbono orgânico (COS) na camada superficial, maior teor na camada intermediária e menor valor na camada mais profunda. Esse comportamento reflete o manejo característico desse sistema, que mantém o solo coberto por resíduos vegetais e minimiza o revolvimento mecânico, favorecendo o acúmulo de carbono orgânico nas camadas mais próximas da superfície (Duarte Júnior e Coelho, 2010).

Esses resultados indicam que o revolvimento mais intenso do solo promove maior oxidação da matéria orgânica e consequente redução do teor de carbono orgânico na superfície (Freitas et al., 2017). Essa tendência reforça o papel do plantio direto na manutenção e acúmulo de matéria orgânica e carbono orgânico em profundidade, devido à menor perturbação física e maior aporte de resíduos vegetais.

Nesse contexto, estudos demonstram que o aumento do tempo de adoção do sistema plantio direto promove o acúmulo e a estabilização do carbono no solo, com predomínio de frações mais estáveis, como a humina, diretamente relacionadas à formação e manutenção dos agregados (Rosset et al., 2016).

Estudos conduzidos por Durigan et al. (2017) avaliaram os efeitos das mudanças de uso do solo (condição de floresta para sistemas agrícolas ou pastagens), sobre os estoques de carbono orgânico e a qualidade das frações da matéria orgânica do solo (MOS). Os autores evidenciaram que sistemas submetidos a maior perturbação, conversão para agricultura (plantio mecanizado), tendem a acelerar a degradação da MOS, ao passo que ambientes manejados de forma conservacionista apresentam maior capacidade de manter ou até incrementar determinadas frações de carbono.

Logo, o estoque de carbono no solo (EstC) resulta do balanço entre o aporte de resíduos orgânicos, provenientes principalmente de folhas, raízes e exsudatos radiculares, e os processos de decomposição conduzidos por microrganismos heterotróficos, como fungos e bactérias, que regulam a dinâmica da matéria orgânica no sistema solo-planta-atmosfera (Marek et al., 2020). Dessa forma, o manejo do solo e dos resíduos culturais influenciam na estabilidade dos estoques de carbono ao longo do perfil.

Nesse contexto, Oliveira et al. (2022), ao avaliarem diferentes sistemas de cultivo em Latossolo sob plantio de cana-de-açúcar, observaram ampla variação nos teores de carbono orgânico total (CO) e nos valores de EstqC, com teores de CO entre 14,1 e 29,6

g kg⁻¹ e estoques variando de 11,27 a 41,5 Mg ha⁻¹, tanto para cana planta quanto para a primeira cana-soca. Esses resultados evidenciam a forte influência do sistema de manejo sobre a dinâmica do carbono no solo.

Estudos anteriores indicam que uma parcela expressiva do COS acumulado em função da manutenção da palhada pode ser perdida durante as operações de preparo do solo realizadas no período de renovação do canavial, em razão da intensificação da mineralização da matéria orgânica promovida pelo revolvimento mecânico (Segnini et al., 2013; Tenelli et al., 2019).

De acordo com Oliveira et al. (2022), sistemas convencionais de preparo, envolvendo o uso de grade e subsolagem, apresentaram menores valores de COS na camada superficial do solo (0,00–0,05 m), enquanto o sistema de plantio direto sobre resíduos vegetais resultou em maior acúmulo de carbono nessa mesma profundidade.

Resultados semelhantes foram reportados por Barbosa et al. (2024), que observaram valores de COS variando de 13,3 a 26,1 g kg⁻¹ e estoques de carbono entre 24,9 e 35,7 Mg ha⁻¹ em áreas cultivadas com cana-de-açúcar submetidas a diferentes níveis de remoção da palhada. Esses autores destacam que a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo contribui para a redução das perdas de carbono e para a maior estabilidade dos estoques ao longo do tempo.

Nesse sentido, os valores de estoque de carbono observados no presente estudo, variando entre 14 e 20 Mg ha⁻¹, apresentam ordem de grandeza compatível com aqueles reportados por Oliveira et al. (2022) para Latossolos cultivados com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de manejo, situando-se, entretanto, abaixo dos valores mais elevados descritos por Barbosa et al. (2024).

Dessa forma, não há uma faixa única e universalmente estabelecida para o estoque de carbono do solo em sistemas agrícolas no Brasil, uma vez que essa faixa é condicionada por múltiplos fatores, incluindo o tipo de solo, as condições climáticas, o uso e o sistema de manejo adotado, a profundidade avaliada, o histórico e o manejo da área. Dessa forma, a literatura científica apresenta valores de referência e intervalos típicos de estoque de carbono que variam conforme o contexto edafoclimático e o sistema de produção considerado.

O sistema de plantio direto apresentou os maiores valores de pH, resultado que pode estar associado à aplicação superficial de calcário, prática característica desse sistema, que favorece a concentração do corretivo nas camadas mais superficiais do solo.

Em contrapartida, nos demais sistemas de preparo, o calcário foi incorporado por meio das operações mecânicas, promovendo sua distribuição em maior volume de solo e, conseqüentemente, resultando em valores de pH ligeiramente inferiores, especialmente no preparo com grade intermediária + grade niveladora, e ainda menores nos sistemas com maior intensidade de revolvimento.

Adicionalmente, o grau de mobilização do solo pode ter influenciado a atividade microbiana, uma vez que o revolvimento tende a aumentar a aeração e a exposição da matéria orgânica à decomposição. Nesse contexto, a intensificação da atividade dos microrganismos promove a mineralização da matéria orgânica, com conseqüente liberação de compostos ácidos e íons H^+ , os quais contribuem para a acidificação do solo e, portanto, para a redução dos valores de pH.

No preparo com arado de aiveca + grade niveladora (AA+GN), a redução do pH pode estar associada à inversão das camadas do solo, que expõe materiais subsuperficiais naturalmente mais ácidos à superfície. Já no tratamento com subsolador de arrasto + grade niveladora (SA+GN), embora não ocorra inversão das camadas, a ruptura em profundidade, combinada à mobilização superficial subsequente, pode ter intensificado a aeração do solo e estimular a mineralização da matéria orgânica. Esse processo favorece a liberação de íons H^+ na solução do solo, contribuindo para a redução do pH. Assim, nesse sistema, a diminuição do pH parece estar mais relacionada à intensificação dos processos biogeoquímicos decorrentes da mobilização mecânica do que propriamente à exposição direta de camadas mais ácidas.

O preparo com grade intermediária + grade niveladora (GI+GN) apresentou valor intermediário de pH. Esse comportamento pode ser explicado pelo tipo de mobilização promovido por esse preparo, caracterizado por atuação predominantemente superficial, sem inversão de camadas e sem ruptura em profundidade, preservando, em maior medida, a estratificação natural do perfil do solo.

Dessa forma, limita-se a exposição de materiais subsuperficiais mais ácidos, resultando em menor perturbação do equilíbrio ácido-base ao longo do perfil. Além disso, a mobilização moderada pode favorecer a incorporação relativamente homogênea de corretivos aplicados na superfície, sem promover redistribuições abruptas de materiais com diferentes reações químicas, contribuindo para a manutenção de condições químicas mais estáveis.

A interpretação dos resultados torna-se mais consistente quando fundamentada na dinâmica do carbono orgânico do solo (COS), componente central na regulação da reação do solo, considerando não apenas seu teor quantitativo, mas também sua estabilidade e a intensidade dos processos de transformação aos quais está submetida. Embora o COS represente a fração mensurável da matéria orgânica do solo (MOS), sua dinâmica reflete diretamente os processos biogeoquímicos associados à MOS.

Nesse contexto, a MOS atua como agente tamponante em função da presença de grupos funcionais reativos capazes de adsorver ou liberar íons H^+ conforme as condições químicas do meio (McCauley, Jones e Olson-Rutz, 2017), sendo sua atuação dependente da interação entre teor, grau de humificação e atividade microbiológica.

No presente estudo, o sistema SA+GN apresentou maior teor de COS, seguido por GN e PD. Entretanto, esse padrão não se refletiu diretamente nos valores de pH, uma vez que o maior pH foi observado no plantio direto, enquanto SA+GN apresentou valores inferiores. Esse comportamento indica que o efeito do COS sobre a acidez não pode ser interpretado exclusivamente com base em sua quantidade total.

No SA+GN, a ruptura mecânica em profundidade associada à mobilização superficial promove maior aeração e estímulo à atividade microbiana, intensificando a mineralização da fração orgânica. Esse processo favorece a produção de ácidos orgânicos e a oxidação de formas reduzidas de nitrogênio, resultando na liberação de H^+ e contribuindo para a acidificação do meio (Fageria e Nascente, 2014; Francioli et al., 2016).

Em contraste, o sistema de plantio direto, mesmo não apresentando o maior teor de COS, proporciona menor perturbação do solo, reduzindo a exposição da matéria orgânica ao oxigênio e, conseqüentemente, a taxa de mineralização. A menor intensidade de decomposição preserva frações orgânicas mais estáveis, potencializando o efeito tamponante descrito por McCauley, Jones e Olson-Rutz (2017). Dessa forma, a manutenção estrutural e a menor geração de H^+ explicam os maiores valores de pH observados nesse sistema.

Durante a decomposição da MOS, formam-se ácidos húmicos e fúlvicos que interagem com a fração mineral do solo, podendo formar complexos estáveis com Al^{3+} (Schwertmann e Taylor, 1989). A complexação do alumínio altera sua atividade na solução do solo e interfere no equilíbrio ácido-base, modulando indiretamente a dinâmica

do pH. Entretanto, quando a perturbação mecânica intensifica a mineralização e a nitrificação, a geração de H^+ pode suplantar esse efeito regulador.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a relação entre COS e pH é mediada pela dinâmica dos processos biogeoquímicos induzidos pelo preparo do solo. Não se trata apenas da quantidade de matéria orgânica e/ou carbono orgânico presente, mas da interação entre seu teor, sua estabilidade e a intensidade de mineralização estimulada pela mobilização mecânica, o que explica a dissociação observada entre o teor de COS e os valores de pH nos diferentes sistemas de preparo avaliados.

A dinâmica de Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentou comportamento semelhante ao observado para o pH, sendo influenciada tanto pelo grau de revolvimento do solo quanto pela forma de aplicação do calcário, uma vez que esse corretivo constitui a principal fonte desses cátions no sistema.

Nesse contexto, a interpretação da distribuição de Ca^{2+} e Mg^{2+} entre os sistemas de manejo requer considerar a natureza do calcário como insumo agrícola. Constituído predominantemente por carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e carbonato de magnésio ($MgCO_3$), o calcário, além de fornecer esses nutrientes, exerce função corretiva da acidez do solo, promovendo elevação do pH, redução da saturação por alumínio trocável e aumento da disponibilidade de outros nutrientes (Santiago; Rosseto, 2022).

Entretanto, sua baixa solubilidade confere reatividade gradual, de modo que sua eficiência agrônômica depende diretamente da forma de aplicação e do grau de mobilização do solo, fatores que condicionam a distribuição dos cátions ao longo do perfil (Santiago; Rosseto, 2022).

Os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram observados nos sistemas de preparo com menor intensidade de perturbação, destacando-se o plantio direto, no qual se verificaram as maiores concentrações desses nutrientes.

Sob essa perspectiva, a manutenção da palhada na superfície, composta por frações mais lábeis da matéria orgânica, contribui para a estabilidade térmica e hídrica do solo, criando condições favoráveis à dissolução gradual do calcário aplicado superficialmente (Resende et al., 2021).

Adicionalmente, a cobertura vegetal estimula a atividade da fauna e da microbiota do solo, cujas interações biológicas, associadas à formação de bioporos e canais radiculares, favorecem a redistribuição gradual dos produtos da reação do corretivo ao longo do perfil (Resende et al., 2021).

A mobilidade do calcário no solo ocorre de forma lenta e progressiva, intensificando-se com o tempo após a aplicação. No sistema de plantio direto, esse deslocamento é favorecido pela continuidade estrutural e pela presença de poros preferenciais, que atuam como vias de fluxo da solução do solo, permitindo a migração gradual de Ca^{2+} e Mg^{2+} para camadas subsuperficiais, mesmo na ausência de incorporação mecânica (Resende et al., 2021).

Esse comportamento está de acordo com Andrade et al. (2012), que observaram que a ausência de revolvimento no plantio direto favorece o acúmulo de matéria orgânica e nutrientes na camada superficial, enquanto sistemas convencionais promovem maior homogeneização desses elementos ao longo da camada mobilizada. Sistemas de manejo com intensidade intermediária, por sua vez, apresentam padrões também intermediários, refletindo o grau de perturbação imposto ao solo.

De modo geral, o sistema de plantio direto destacou-se pela maior manutenção dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas superficiais, indicando maior conservação da fertilidade química. Em contraste, o preparo com maior intensidade de revolvimento, como o arado de aiveca associado à grade niveladora, apresentou menores teores desses nutrientes, evidenciando o efeito da mobilização mecânica na redistribuição e possível diluição dos cátions no perfil.

Os preparos PD, GI+GN, AA+GN, SA+GN e GN apresentaram concentrações médias de Ca^{2+} de 29,33; 24,83; 18,08; 22,41 e 25,08 mmolc dm^{-3} , respectivamente. Considerando o intervalo indicado por Alvarez et al. (1999) para obtenção de elevados rendimentos na cultura da cana-de-açúcar, no qual os teores de Ca^{2+} devem situar-se entre 2,41 e 4,00 cmolc dm^{-3} (equivalentes a 24,1 a 40 mmolc dm^{-3}), verifica-se que os tratamentos PD, GI+GN e GN encontram-se dentro da faixa considerada adequada.

Por outro lado, os tratamentos AA+GN (18,08 mmolc dm^{-3}) e SA+GN (22,41 mmolc dm^{-3}) apresentaram valores inferiores ao limite mínimo recomendado, o que pode indicar restrição potencial à disponibilidade de cálcio no solo.

Os teores médios de magnésio (Mg^{2+}) foram de 8,16; 7,16; 6,25; 5,41 e 8,66 mmolc dm^{-3} para os preparos PD, GI+GN, AA+GN, SA+GN e GN, respectivamente. De acordo com Alvarez et al. (1999), os níveis adequados de Mg^{2+} para a cultura da cana-de-açúcar situam-se entre 0,91 e 1,50 cmolc dm^{-3} (equivalentes a 9,1–15,0 mmolc dm^{-3}). Nesse sentido, observa-se que todos os tratamentos apresentaram teores inferiores ao

intervalo recomendado, evidenciando baixa disponibilidade de magnésio no solo, independentemente do sistema de preparo adotado.

O fertilizante foi aplicado após a realização dos preparos do solo, de modo que as diferenças observadas não estão associadas à incorporação direta de P e K, mas sim às modificações físicas e biológicas induzidas por cada sistema de manejo, que condicionam a dinâmica posterior desses nutrientes no solo.

Os teores de fósforo disponível observados neste estudo superaram a faixa considerada adequada para a cultura da cana-de-açúcar, estabelecida por Alvarez et al. (1999) (12,1–18,0 mg dm⁻³), com valores médios variando entre 27,83 e 35,08 mg dm⁻³. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito residual de adubações fosfatadas anteriores, uma vez que o P é tradicionalmente aplicado em doses elevadas no sulco de plantio (100–150 kg de P₂O₅ ha⁻¹), visando superar sua elevada fixação por óxidos de Fe e Al em solos tropicais (Rosseto; Santiago, 2022).

Devido à sua baixa mobilidade e elevada capacidade de adsorção, parte do fósforo não absorvido tende a permanecer acumulado, especialmente nas camadas superficiais e em sistemas com menor revolvimento do solo. Esse padrão é consistente com observações de maior disponibilidade de P em sistemas conservacionistas, como o plantio direto (Rodrigues et al., 2016; 2021; Tiecher et al., 2012).

A maior concentração de P na superfície está, portanto, relacionada predominantemente às suas características químicas intrínsecas, e não ao efeito direto do preparo do solo. Adicionalmente, a maior atividade enzimática na superfície pode contribuir para a mineralização de formas orgânicas, incrementando a fração disponível.

A dinâmica do potássio, por sua vez, esteve associada tanto à mobilidade do nutriente quanto às interações no complexo de troca. A competição entre Ca²⁺ e K⁺ por sítios da CTC exerce papel determinante na sua distribuição, uma vez que o Ca²⁺, por ser bivalente, apresenta maior afinidade pelos colóides do solo (Schneider; Mollier, 2016).

Nos sistemas com maior concentração superficial de Ca²⁺ e Mg²⁺, como o plantio direto e a grade niveladora, a maior saturação da CTC por cátions bivalentes pode ter favorecido o deslocamento relativo de K⁺ para camadas subsuperficiais. Em contraste, nos preparos com maior mobilização (AA+GN, GI+GN e SA+GN), a redistribuição do calcário no perfil reduziu essa competição na superfície, favorecendo maior retenção relativa de K⁺ nessa camada.

No caso do subsolador, a ruptura de camadas compactadas e o aumento da macroporosidade em profundidade contribuíram adicionalmente para o deslocamento vertical do K^+ , evidenciando a interação entre fatores estruturais e químicos na sua dinâmica.

Os teores de K^+ observados, em sua maioria superiores à faixa recomendada por Alvarez et al. (1999) (1,82–3,07 mmolc dm^{-3}), refletem o acúmulo decorrente de adubações sucessivas (80–150 kg de K_2O ha^{-1}), associado à capacidade do solo em reter esse cátion na fase trocável (Rosseto; Santiago, 2022).

De forma integrada, os resultados indicam que a distribuição de P e K no perfil do solo foi condicionada pelo histórico de manejo, pelas propriedades químicas intrínsecas dos nutrientes e pelas alterações estruturais promovidas pelos sistemas de preparo. Enquanto o fósforo apresentou padrão dominado por baixa mobilidade e acúmulo superficial, o potássio respondeu de forma mais dinâmica, sendo influenciado pela competição com cátions bivalentes e pela continuidade estrutural do perfil.

Adicionalmente, o plantio direto destacou-se por apresentar menores valores de acidez potencial, indicando melhor conservação das condições químicas do solo em comparação aos sistemas com maior perturbação.

A redução da soma de bases observada após a primeira colheita da cana-soca indica que os sistemas com maior intensidade de revolvimento promoveram redistribuição e diluição inicial das bases trocáveis no perfil. Ao longo do ciclo da cultura, processos como absorção e exportação de nutrientes, além da mobilidade diferencial dos cátions contribuíram para consolidar esse padrão, refletindo o efeito integrado do manejo inicial e da dinâmica química subsequente do solo.

Diante dos dois atributos químicos avaliados, acidez potencial (H+Al) e soma de bases (SB), observou-se uma relação inversamente proporcional entre eles. Os sistemas de preparo de solo com revolvimento parcial ou total promoveram elevação nos valores de H+Al, o que resultou, conseqüentemente, na redução da SB.

As médias de acidez potencial foram de 14,91; 18,16; 18,08; 19,08 e 17,75 mmolc dm^{-3} , enquanto as respectivas somas de bases foram de 41,45; 36,83; 27,97; 25,04 e 39,43 mmolc dm^{-3} , para os manejos plantio direto, grade intermediária, arado de aiveca, subsolador e grade niveladora. Nota-se que o sistema plantio direto apresentou o menor valor de acidez potencial e, simultaneamente, a maior soma de bases, evidenciando sua

capacidade de conservar a fertilidade química do solo em comparação aos métodos de preparo mecânico.

Resultados semelhantes foram relatados por Campos et al. (2011), ao avaliarem um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. Os autores verificaram que o sistema de plantio direto, especialmente após nove anos de adoção, apresentou maiores valores de pH e menores concentrações de Al^{3+} , H^+Al e $\text{m}\%$, quando comparado ao preparo convencional.

Além disso, sob plantio direto de cinco e nove anos, observaram-se incrementos expressivos nos teores de Ca^{2+} e K^+ , bem como elevações na soma de bases (SB), na capacidade de troca catiônica efetiva (t) e potencial (T), na saturação por bases (V%) e nos teores de fósforo disponível, particularmente até a camada de 0,20 m. Esses resultados reforçam que sistemas conservacionistas proporcionam melhoria contínua das condições químicas do solo, favorecendo o acúmulo de bases trocáveis e a redução da acidez potencial ao longo do tempo (Campos et al., 2011).

Os resultados mostram que os manejos com preparo leve ou mínimo tendem a manter ou melhorar a CTC em superfície, enquanto o preparo mais intenso (arado de aiveca) reduz a capacidade de troca catiônica, possivelmente em decorrência da menor proteção da matéria orgânica.

Entretanto, a variação da CTC entre os sistemas de preparo pode ser compreendida pela interação entre pH do solo, teor de matéria orgânica (MOS) e intensidade de mobilização, fatores determinantes em solos altamente intemperizados. O preparo com arado de aiveca + grade niveladora apresentou os menores valores de CTC, o que pode ser atribuído ao menor pH e aos menores teores de COS observados nesse tratamento.

Em solos altamente intemperizados, como o avaliado neste trabalho, grande parte da capacidade de troca catiônica (CTC) é dependente de cargas variáveis associadas à fração orgânica; dessa forma, a diminuição da matéria orgânica implica redução direta do número de sítios negativos disponíveis para retenção de cátions.

Nesse contexto, sistemas de manejo que promovem maior revolvimento, como o Arado de Aiveca, tendem a intensificar a mineralização da matéria orgânica em razão do aumento da aeração, reduzindo seu teor ao longo do tempo e, conseqüentemente, a CTC do solo. A menor geração de cargas negativas limita a retenção de cátions essenciais, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , favorecendo sua redistribuição no perfil e reduzindo a estabilidade química do sistema.

Desta maneira, a redução da matéria orgânica não apenas afeta a atividade biológica do solo, mas também compromete sua capacidade de armazenar e disponibilizar nutrientes, refletindo diretamente na fertilidade e no desempenho produtivo das culturas ao longo do ciclo (Beutler et al., 2014).

Em contrapartida, o Plantio Direto apresentou comportamento intermediário na camada superficial e maior CTC na camada intermediária, resultado da manutenção relativa da matéria orgânica e do maior pH superficial decorrente da aplicação não incorporada de calcário.

Assim, os resultados indicam que a intensidade de revolvimento influencia diretamente a dinâmica da MOS e do pH, refletindo na geração e na distribuição das cargas negativas responsáveis pela capacidade de troca catiônica ao longo do perfil do solo.

Os sistemas de menor revolvimento do solo, especialmente o Plantio Direto e a Grade Intermediária + Grade Niveladora, mantêm maiores teores de bases trocáveis e elevada saturação superficial, refletindo maior conservação da fertilidade.

De acordo com os critérios estabelecidos por Alvarez et al. (1999), rendimentos satisfatórios de cana-de-açúcar são alcançados quando a saturação por bases (V%) se mantém na faixa de 60 a 80%. No presente estudo, os tratamentos PD, GI+GN, SA+GN e GN apresentaram valores de V% dentro desse intervalo, com 73,25; 71,75; 61,75 e 66,33%, respectivamente. Apenas o tratamento AA+GN, correspondente ao arado de aiveca, apresentou valor ligeiramente inferior ao limite mínimo recomendado (59,58%), indicando uma condição marginalmente menos favorável à produtividade da cultura.

A variação da saturação por bases (V%) não esteve diretamente associada à capacidade de troca catiônica (CTC), mas à fração efetivamente ocupada por cátions básicos nos sítios de troca do solo. Assim, o V% expressa predominantemente a relação entre a soma de bases (SB) e a CTC, e não apenas o potencial total de retenção de cargas.

A menor CTC observada no sistema com arado de aiveca confirma que o revolvimento intenso compromete a estabilidade química do solo. Conseqüentemente, a redução da soma de bases e do V% reflete não apenas a redistribuição das bases no perfil, mas também a menor capacidade do solo em retê-las.

O sistema com subsolador de arrasto + grade niveladora também apresentou menor V%, uma vez que, embora a CTC não tenha sido a mais baixa em todas as camadas,

houve redução proporcional da SB em relação à CTC, resultando em menor saturação por bases.

Adicionalmente, deve-se considerar o histórico recente de aplicação de vinhaça na área experimental. A primeira aplicação ocorreu 30 dias após a colheita da cana-planta, e a segunda, 20 dias após a colheita da primeira cana-soca, sendo a amostragem realizada menos de sete dias após essa reaplicação.

Esse curto intervalo entre a aplicação e a coleta pode ter influenciado temporariamente a saturação por bases no perfil, uma vez que a vinhaça constitui fonte de cátions básicos, especialmente K^+ , além de compostos orgânicos de rápida decomposição. Em curto prazo, a adição desse resíduo pode promover alterações transitórias na solução do solo, seja pelo incremento momentâneo da saturação por bases, seja pela intensificação da atividade microbiana (Carpanez et al., 2022).

Em contraste, o sistema plantio direto apresentou CTC intermediária e maior V%, evidenciando maior ocupação da capacidade de troca por cátions básicos, o que pode ser atribuído à aplicação superficial de calcário e à conservação relativa da matéria orgânica.

Em relação os atributos microbiológicos, o carbono da biomassa microbiana (CBMS) representa a quantidade de carbono contida nas células dos microrganismos do solo. Assim, valores elevados de CBMS indicam maior abundância de microrganismos vivos, maior capacidade de decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, uma atividade biológica mais intensa, refletindo um solo mais ativo e saudável (Insam; Domsch, 1988).

Os maiores valores de CBMS observados nos sistemas arado de aiveca + grade niveladora (AA+GN), subsolador de arrasto + grade niveladora (SA+GN) e grade niveladora isolada (GN) podem ser explicados pela combinação entre maior disponibilidade de carbono orgânico em determinadas camadas e condições físicas mais favoráveis à atividade microbiana.

Embora a densidade do solo não tenha diferido entre os tratamentos, os sistemas mobilizados apresentaram maior porosidade total e, sobretudo, maiores valores de macroporosidade (especialmente AA+GN e GI+GN), além de menores valores de resistência à penetração (no caso de AA+GN), favorecendo a difusão de oxigênio, a dinâmica da água e o contato entre microrganismos e substrato.

No caso específico do SA+GN e da GN, os maiores teores de carbono orgânico na camada superficial e profunda indicam maior disponibilidade de substrato energético,

fator diretamente relacionado ao aumento da biomassa microbiana. Além disso, mesmo apresentando valores de pH ligeiramente inferiores ao plantio direto, esses sistemas mantiveram a saturação por bases suficientes para não limitar a atividade biológica, sugerindo que a disponibilidade de carbono e as condições estruturais tiveram papel mais determinante do que pequenas variações na acidez ativa.

Por outro lado, o plantio direto (PD), embora tenha apresentado maior pH, maiores teores de Ca^{2+} e maior saturação por bases (V%), apresentou menor macroporosidade e menor porosidade total, além de resistência à penetração intermediária, o que pode ter limitado parcialmente a aeração e a difusão de oxigênio nos substratos do solo. Adicionalmente, os teores de carbono orgânico no PD foram predominantemente intermediários ao longo do perfil, não se destacando como os mais elevados em todas as camadas avaliadas.

Assim, apesar do ambiente químico mais favorável sob o ponto de vista da fertilidade, a menor renovação estrutural do solo e a menor redistribuição de resíduos orgânicos promovida pela ausência de mobilização podem ter reduzido o estímulo à proliferação microbiana. Esses resultados indicam que, após a segunda colheita da cana-de-açúcar, o CBMS parece responder de forma mais intensa à disponibilidade e à redistribuição do carbono associadas à mobilização inicial do solo do que exclusivamente às melhorias na condição química promovidas pelo sistema conservacionista.

A grade intermediária + grade niveladora (GI+GN) ter apresentado o menor CBMS pode ser compreendida por um efeito combinado de mobilização superficial intensa, menor acúmulo de carbono orgânico e possível instabilidade estrutural pós-revolvimento, resultando em ambiente menos favorável à manutenção da biomassa microbiana ao longo do tempo.

Primeiramente, embora esse sistema tenha promovido aumento da porosidade total e da macroporosidade após o preparo, esse tipo de mobilização superficial desagrega o solo sem promover descompactação em profundidade, diferentemente do arado de aiveca ou do subsolador.

Essa desestruturação pode ter acelerado a oxidação da matéria orgânica, estimulando a atividade microbiana inicial, porém reduzindo o estoque de carbono lábil disponível posteriormente. Isso é coerente com os menores teores de carbono orgânico observados em algumas camadas nesse tratamento, limitando o principal substrato energético da microbiota.

Além disso, apesar de apresentar V% relativamente elevada, o GI+GN não se destacou em teores de Ca^{2+} ou Mg^{2+} nas camadas superficiais, e também não apresentou os maiores valores de carbono orgânico em nenhuma profundidade.

Assim, diferentemente do plantio direto que compensou limitações físicas com melhor ambiente químico; e os sistemas AA+GN e SA+GN que combinaram redistribuição de carbono com melhoria estrutural mais profunda, o GI+GN pode ter promovido uma condição transitória de aeração elevada, seguida por reconsolidação estrutural, sem aporte adicional de carbono suficiente para sustentar maior biomassa microbiana.

O preparo do solo não atua mais como um distúrbio recente, mas como um fator condicionante das condições físicas e químicas do ambiente edáfico, modulando a disponibilidade de substrato, a aeração, a umidade e, conseqüentemente, a atividade microbiana mesmo após dois ciclos produtivos.

A persistência dessas diferenças pode ser atribuída, em parte, às alterações estruturais promovidas pela mobilização inicial do solo. Operações como aração e subsolagem modificam a densidade, a porosidade total e a distribuição de macro e microporos, afetando a difusão de oxigênio, a retenção de água e a conectividade entre microrganismos e substrato orgânico.

Ainda que o tráfego de máquinas e o crescimento radicular ao longo dos ciclos da cultura promovam certa reorganização estrutural, mudanças profundas na arquitetura do solo podem permanecer por mais de um ciclo agrícola.

Dessa forma, os sistemas que proporcionaram melhores condições físicas podem ter mantido ambiente mais favorável ao desenvolvimento microbiano, refletindo-se nos maiores valores de CBMS observados.

Além dos efeitos físicos, a mobilização do solo influencia a redistribuição da matéria orgânica e dos corretivos aplicados, alterando a disponibilidade de carbono e nutrientes no perfil. O revolvimento promove maior contato entre resíduos culturais, solo e microrganismos, podendo estimular a decomposição do carbono lábil e modificar temporariamente a atividade microbiana.

Paralelamente, a incorporação diferenciada do calcário pode ter alterado o pH e a saturação por bases em diferentes camadas, influenciando a composição e a abundância da biomassa microbiana. Com o avanço dos ciclos da cana-de-açúcar e a deposição contínua de palhada, tende a ocorrer uma estabilização biológica do sistema; contudo, as

condições iniciais estabelecidas pelo preparo ainda podem direcionar a trajetória da reorganização física, química e biológica do solo.

Os resultados observados no presente estudo corroboram o que foi relatado por Luz et al. (2022), ao denotarem que as intervenções realizadas no momento do preparo do solo podem exercer influência prolongada sobre os atributos físicos, mesmo após sucessivos ciclos de colheita da cana-de-açúcar.

Segundo os autores, características estruturais como porosidade e estabilidade de agregados mantiveram padrões distintos entre sistemas de preparo convencional e reduzido ao longo do tempo, evidenciando que os efeitos da mobilização e do tráfego de máquinas não são rapidamente dissipados.

De forma semelhante, no presente trabalho, verificou-se que o preparo inicial continuou influenciando os atributos do solo mesmo após duas colheitas, reforçando a ideia de que alterações na arquitetura do solo podem persistir por mais de um ciclo agrícola.

Essa redução vertical é coerente com o padrão observado em atributos químicos, podendo ser atribuída à maior concentração de raízes finas, resíduos orgânicos e atividade microbiana na camada superficial. Por exemplo, Santos et al. (2004) verificaram que, à medida que a profundidade aumentava, os valores de carbono da biomassa microbiana diminuíam, resultado diretamente associado às menores concentrações de carbono orgânico nas camadas subsuperficiais.

A respiração basal do solo representa a quantidade de CO₂ liberada pelos microrganismos durante a decomposição da matéria orgânica. Quanto maior a liberação de CO₂, maior é a atividade microbiana e o metabolismo dessas comunidades no ambiente edáfico, sendo, portanto, um indicador direto da atividade biológica do solo (Silva et al., 2013).

O plantio direto apresentou um desempenho melhor a tendência numérica, com valor até 19,8% superior ao tratamento com Arado de Aiveca + Grade Niveladora, que apresentou o menor resultado entre os preparos avaliados. Em relação aos demais tratamentos, o PD foi 3,8% superior ao SA + GN, 5,8% superior à GI + GN, e 9 % superior a GN.

Essa tendência observada no presente estudo é coerente com os resultados reportados por Santos et al. (2004). Ao compararem o plantio direto ao preparo convencional, os autores verificaram maiores valores de respiração basal no PD,

atribuindo esse comportamento aos maiores teores de carbono orgânico total acumulados nesse sistema.

Resultados semelhantes foram relatados por Balota et al. (1997), Sall et al. (2006) e Meriles et al. (2009), os quais verificaram maior atividade respiratória microbiana em sistemas que evitam o revolvimento intenso do solo.

Assim, a superioridade do plantio direto em nossos resultados reforça que práticas conservacionistas favorecem a atividade microbiana, especialmente pela maior disponibilidade de C orgânico, essencial para sustentar a respiração e o metabolismo do microbioma do solo.

Todavia, a interpretação desses valores deve ser realizada com cautela, pois uma maior respiração basal nem sempre está associada a solos mais produtivos. Em alguns casos, taxas elevadas podem indicar que o solo encontra-se sob algum distúrbio, levando à perda de carbono orgânico para a atmosfera e reduzindo o estoque de carbono orgânico do solo e, conseqüentemente, sua capacidade de sustentar a fertilidade (Islam; Weil, 2000).

Por outro lado, Lourent et al. (2011) observaram maiores valores de respiração basal em áreas de mata nativa quando comparadas a sistemas agrícolas, resultado atribuído aos maiores teores de carbono da biomassa microbiana presentes nesses ambientes. Assim, a interpretação da RB deve sempre ser associada a outros atributos biológicos e químicos do solo, evitando conclusões isoladas e potencialmente equivocadas.

A redução média de 45,5 a 50,0% da camada superficial para as camadas subsuperficiais configura um padrão esperado, uma vez que os primeiros centímetros do solo concentram maiores teores de matéria orgânica, resíduos culturais e compostos orgânicos recentemente incorporados, que constituem a principal fonte de energia para os microrganismos heterotróficos. Esse comportamento já foi observado por Santos et al. (2004), que também registraram maiores taxas de respiração na camada superficial em comparação às camadas mais profundas, associando esse resultado à maior disponibilidade de substratos orgânicos na superfície.

Evidências mais recentes reforçam essa interpretação. Ren et al. (2023), em seus estudos mostraram que o solo da rizosfera, zona diretamente influenciada pelas raízes, apresenta maiores teores de matéria orgânica, carbono orgânico dissolvido e biomassa microbiana em relação ao solo fora da influência radicular. Tal condição ocorre porque a

presença de raízes e a liberação contínua de exsudatos radiculares elevam a disponibilidade de carbono lábil, especialmente nas camadas superficiais do perfil.

De forma complementar, Kramer e Gleixner (2008), pontuaram que a contribuição do carbono de origem vegetal (resíduos vegetais e exsudatos radiculares) para a biomassa microbiana diminui significativamente com a profundidade do solo. Segundo os autores, esse carbono é mais influente nos primeiros 0–20 cm, faixa em que se observam maiores taxas de respiração microbiana e maior utilização de frações lábeis da matéria orgânica.

Assim, a maior respiração basal registrada na camada superficial do presente estudo pode ser atribuída à maior oferta de substratos de rápida decomposição, como resíduos vegetais e carbono novo derivado das plantas, cuja disponibilidade decresce progressivamente nas camadas mais profundas do solo.

O quociente metabólico (qCO_2) expressa a taxa de respiração específica da biomassa microbiana. Esse índice representa o nível de estresse metabólico dos microrganismos, pois é calculado pela razão entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana por unidade de tempo (Anderson; Domsch, 1993; Alves et al., 2011).

Em outras palavras, o qCO_2 indica quanto CO_2 os microrganismos liberam para cada unidade de biomassa existente. Assim, valores elevados de qCO_2 refletem comunidades que precisam gastar mais energia apenas para se manterem, respirando além do esperado para o seu tamanho (Anderson; Domsch, 1993; Alves et al., 2011).

Em relação ao Plantio Direto (PD = 0,06), as diferenças percentuais entre os preparos foram para GI + GN (16,7% superior ao PD), AA + GN (16,7% inferior ao PD), SA + GN (igual ao PD, 0% de diferença), e GN (16,7% inferior ao PD).

Os resultados evidenciam que, mesmo dois anos após a realização dos preparos, os efeitos da mobilização do solo ainda se refletem de maneira marcante nos atributos físicos e biológicos avaliados, demonstrando a persistência do preparo sobre o funcionamento do sistema solo.

O tratamento GI + GN caracterizou-se por maior macroporosidade, menor carbono orgânico (CO), menor estoque de carbono, menor carbono da biomassa microbiana (CBMS) e maior quociente metabólico (qCO_2), além de menor quociente microbiano ($qMic$).

Esse conjunto de resultados evidencia um sistema estruturalmente mais aerado, porém biologicamente menos eficiente e com menor capacidade de retenção de carbono.

A maior macroporosidade indica que a desagregação promovida pela grade intermediária gerou poros estruturais persistentes, favorecendo a difusão de oxigênio e intensificando processos oxidativos. Tal condição pode ter acelerado a mineralização da matéria orgânica ao longo do tempo, justificando os menores teores de CO e estoque de carbono mesmo após dois anos da intervenção mecânica.

A redução do CBMS associada ao aumento do qCO_2 indica que a microbiota opera com maior custo energético por unidade de biomassa. Em termos ecológicos, trata-se de um sistema no qual a comunidade microbiana respira mais para manter suas funções básicas, mas acumula menos biomassa e menor fração estável de carbono.

O tratamento AA + GN apresentou maior macroporosidade, microporosidade e porosidade total, menor CO e estoque de carbono, porém maior CBMS e menor qCO_2 . Embora o arado de aiveca promova intensa mobilização e inversão das camadas, sua ação mais profunda pode ter redistribuído resíduos e criado ambiente físico mais favorável ao crescimento radicular e microbiano em todo o perfil mobilizado. O maior CBMS sugere que parte do carbono mobilizado foi incorporado à biomassa microbiana, indicando maior capacidade de reorganização biológica.

O menor qCO_2 indica maior eficiência metabólica, ou seja, a microbiota apresenta menor gasto energético relativo para manutenção. Diferentemente da GI + GN, o sistema parece ter atingido um novo equilíbrio funcional após dois anos, ainda que com menor estoque total de carbono.

O tratamento GN isolada apresentou menor macroporosidade, maior microporosidade, maiores teores de CO e estoque de carbono, além de menor quociente metabólico. A predominância de microporos favorece a proteção física da matéria orgânica dentro de agregados, reduzindo sua exposição à oxidação e contribuindo para maior conservação de carbono ao longo do tempo. O menor qCO_2 sugere uma microbiota metabolicamente mais eficiente e menos estressada, operando sob condições de maior estabilidade estrutural.

Mesmo após dois anos da realização dos preparos, o sistema que promoveu desagregação intermediária (GI + GN) ainda apresentam reflexos de maior oxidação da matéria orgânica, menor biomassa microbiana e maior custo metabólico. Já o revolvimento profundo com inversão (AA + GN) parece ter promovido uma reorganização estrutural mais ampla, permitindo maior acúmulo de biomassa microbiana e maior eficiência metabólica relativa, embora com redução do estoque de carbono.

Por sua vez, o revolvimento superficial restrito (GN) demonstrou maior conservação de carbono e maior estabilidade funcional do sistema, evidenciada pelo menor quociente metabólico. De forma geral, os resultados indicam que a intensidade e o tipo de preparo modulam não apenas a estrutura física do solo, mas também a eficiência ecológica da microbiota e a dinâmica de conservação do carbono, com efeitos persistentes mesmo após dois anos da intervenção mecânica.

O plantio direto manteve valores intermediários e estáveis de qCO_2 , indicando equilíbrio entre respiração basal e biomassa microbiana, o que caracteriza eficiência energética e menor estresse fisiológico microbiano. Por outro lado, valores ligeiramente mais altos em GI + GN podem refletir uma resposta de ajuste metabólico à perturbação do solo, o que é típico de ambientes em regeneração microbiana. Logo, a redução consistente do qCO_2 em profundidade reforça que as camadas superficiais concentram maior atividade microbiana.

Essa redução de 37,5% da camada superficial para as camadas mais profundas demonstra diminuição da atividade respiratória relativa da biomassa microbiana com o aumento da profundidade. A redução do qCO_2 em profundidade ocorre devido a menor disponibilidade de substratos orgânicos facilmente degradáveis, o que limita a respiração microbiana.

No presente estudo, os valores de qCO_2 variaram de 0,05 a 0,07. Entretanto, essa variação não foi interpretada como indicativa de menor qualidade biológica, uma vez que os valores absolutos do qCO_2 podem ser fortemente influenciados por fatores como a temperatura de incubação, o tempo de avaliação e a própria metodologia utilizada (Wang et al., 2004).

Assim, as comparações diretas com valores de referência de outras pesquisas podem levar a interpretações equivocadas. Portanto, a análise conjunta da respiração basal (18,16; 17,16; 15,16; 17,50; 16,66 $\mu gCO_2/g^{-1}$ dia), do carbono da biomassa microbiana (268,08; 239,58; 275,58; 289,16; 289,83 $\mu gC/g^{-1}$ solo) e do quociente metabólico (0,06; 0,07; 0,05; 0,06; 0,05) nos sistemas de plantio direto, grade intermediária, arado de aiveca, subsolador de arrasto e grade niveladora evidencia uma relação consistente entre a intensidade de revolvimento do solo e a eficiência metabólica da microbiota.

O plantio direto apresentou qCO_2 intermediário (0,06), associado a um CBM elevado (268,08), o que sugere a presença de uma comunidade microbiana mais ativa e

em constante renovação, favorecida pela manutenção da palhada e pela menor perturbação estrutural. Em contraste, o arado de aiveca, que promove maior mobilização do solo, apresentou o menor qCO_2 (0,05), mesmo com elevado CBM (275,58), indicando uma comunidade microbiana mais estabilizada e metabolicamente menos demandante de energia.

De modo geral, valores mais baixos de qCO_2 observados nos sistemas de preparo, como aiveca e grade niveladora, verifica-se menor atividade metabólica por unidade de biomassa, ao passo que sistemas conservacionistas, como o plantio direto, apresentou equilíbrio entre biomassa e respiração, indicando estabilidade funcional, sem sinais claros de estresse metabólico. Esses resultados reforçam a importância de interpretar o qCO_2 de forma integrada aos valores de CBM e respiração basal, permitindo distinguir se a maior atividade microbiana está relacionada a condições de estresse ou à eficiência biológica do sistema de manejo.

O quociente microbiano é definido como a proporção entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total do solo. Trata-se de um indicador empregado para avaliar a qualidade da matéria orgânica, pois expressa a fração do carbono orgânico que se encontra imobilizada na biomassa, evidenciando a eficiência dos microrganismos na utilização dos compostos orgânicos (Silva et al., 2010).

Esse parâmetro também reflete a capacidade de reserva do carbono orgânico no sistema edáfico, de modo que valores reduzidos de $qMic$ associados a ambientes degradados, caracterizados por menor estoque de compostos orgânicos e redução da atividade biológica (Carneiro et al., 2009).

Segundo Jakelaitis et al. (2008), o quociente microbiano ($qMic$) apresenta variação típica entre 1% e 4%, sendo que valores inferiores a 1% sugerem a presença de fatores limitantes à atividade microbiana no solo.

De acordo com Jenkinson e Ladd (1981), o valor de equilíbrio desse indicador em solos cultivados é de aproximadamente 2,2%, refletindo uma condição em que a dinâmica entre o carbono orgânico total e o carbono microbiano encontra-se estabilizada. No presente estudo, os valores médios obtidos foram 2,31% (PD), 2,21% (GI+GN), 2,82% (AA+GN), 2,56% (SA+GN) e 2,49% (GN).

Assim, os tratamentos PD e GI+GN apresentam valores muito próximos ao ponto de equilíbrio proposto, indicando que o sistema solo–microrganismos nesses manejos tende a estar em estabilidade funcional. Os demais tratamentos (AA+GN, SA+GN e GN)

apresentaram valores ligeiramente superiores ao índice de equilíbrio, o que pode sugerir maior disponibilidade de carbono facilmente metabolizável ou condições ambientais favoráveis à biomassa microbiana, elevando a proporção de carbono microbiano em relação ao carbono orgânico total.

Em relação à atividade enzimática, os maiores valores foram observados na camada superficial (0,00–0,15 m), com redução progressiva em profundidade para todas as enzimas avaliadas. Esse comportamento reflete a maior concentração de carbono orgânico e biomassa microbiana na camada superficial, condições que favorecem o crescimento microbiano e a produção de enzimas.

Estudos recentes mostram que a atividade de fosfatase no solo, incluindo a fosfatase ácida, constitui uma resposta funcional e regulada à disponibilidade de fósforo no sistema solo–planta. De acordo com a meta-análise conduzida por Janes-Bassett et al. (2022), a produção dessa enzima é modulada principalmente pela forma e disponibilidade do nutriente: em condições de menor disponibilidade de fósforo inorgânico e maior proporção de fósforo orgânico, ocorre estímulo à síntese e liberação de fosfatase por microrganismos e raízes, com o objetivo de intensificar a mineralização do P orgânico e, assim, sustentar a oferta de P assimilável.

Por outro lado, quando os teores de fósforo inorgânico disponível no solo são elevados, a necessidade fisiológica de mineralização do P orgânico diminui, resultando em inibição ou redução da atividade enzimática. Esse mecanismo caracteriza um processo de regulação, no qual a produção de fosfatase ácida é ajustada conforme a demanda nutricional do sistema.

Embora a literatura indique que a atividade de fosfatase ácida tende a aumentar sob condições de menor disponibilidade de fósforo inorgânico, no presente estudo a maior atividade observada na camada superficial nos tratamentos GN e SA+GN ocorreu concomitantemente aos maiores teores de P disponível.

Esse comportamento sugere que, nesse caso, a atividade enzimática esteve mais relacionada ao maior dinamismo biológico e à ciclagem de nutrientes do que a uma resposta adaptativa à deficiência de fósforo. Em profundidade, a ausência de diferenças entre os preparos indica menor sensibilidade da atividade enzimática às alterações estruturais promovidas pelo manejo, com redução concomitantemente do COS e raízes frescas da cultura.

Os menores valores de atividade de fosfatase observado no plantio direto não necessariamente refletem deficiência de fósforo, mas sim um equilíbrio funcional no qual a demanda por mineralização de P orgânico é reduzida pelo estado de disponibilidade de P inorgânico no perfil avaliado.

Portanto, a atividade da fosfatase é induzida principalmente quando há necessidade de liberar fosforo orgânico. No plantio direto a disponibilidade de P está em equilíbrio, reduzindo a necessidade de maior produção enzimática. Contudo, a menor atividade não indica deficiência, mas possível estabilidade funcional.

Em síntese a maior atividade de fosfatase ácida nos sistemas GN e SA+GN não está necessariamente associada à deficiência de P, mas sim à maior atividade biológica e dinâmica da matéria orgânica. Por outro lado, o plantio direto apresentou menor atividade enzimática mesmo com teores adequados de P, o que sugere equilíbrio funcional na ciclagem do nutriente e menor necessidade de produção enzimática para sua mineralização.

Os processos de mineralização do enxofre concentram-se nas camadas superficiais do solo, onde há maior abundância de microrganismos e substratos orgânicos, refletindo-se na maior atividade da enzima arilsulfatase.

Lisboa et al. (2012) verificaram diferenças significativas na atividade da arilsulfatase entre sistemas de preparo, observando consistentemente maiores valores nos manejos sem revolvimento. No contraste entre preparo convencional e sistemas conservacionistas (CN/PD), os tratamentos sem mobilização do solo apresentaram as maiores taxas de atividade enzimática em todos os períodos avaliados.

Esses achados são reforçados por Melero et al. (2008), que também observaram maior atividade da arilsulfatase no plantio direto em comparação ao preparo convencional, atribuindo esse comportamento ao maior acúmulo de carbono proporcionado pelos sistemas menos intensivos.

No presente estudo, observou-se tendência semelhante, uma vez que os sistemas de menor perturbação, especialmente o plantio direto e o preparo com grade niveladora, que promove revolvimento leve, apresentaram as maiores atividades da arilsulfatase.

Em contraste, os manejos mais intensivos, como a grade intermediária + GN e o arado de aiveca + GN, resultaram nas menores taxas enzimáticas, indicando que o aumento da mobilização do solo reduz a atividade da arilsulfatase possivelmente devido à menor estabilidade da matéria orgânica e ao impacto negativo sobre a microbiota.

Onde à menor disponibilidade de carbono orgânico e a menor atividade microbiana nas camadas subsuperficiais, evidencia a sensibilidade dessa enzima beta-glicosidase como indicador da qualidade microbiológica do solo.

De maneira semelhante, van den Bossche et al. (2008) observaram que a atividade dessa enzima foi aproximadamente duas vezes maior em sistemas de plantio direto e preparo reduzido quando comparada ao preparo convencional. Os autores atribuíram esse desempenho superior à maior capacidade dos sistemas conservacionistas de acumular carbono no solo, sobretudo nas camadas superficiais, interpretação que também é sustentada pelos resultados de Melero et al. (2008).

A interação significativa entre preparo e profundidade mostra que a resposta da atividade enzimática ao manejo do solo é dependente da camada avaliada. Embora nenhum sistema de preparo tenha promovido aumento consistente das enzimas em todas as profundidades, os preparos como o Plantio Direto e a Grade Niveladora, mantiveram maior potencial enzimático nas camadas superficiais, indicando sua eficiência em preservar o funcionamento microbiano e os processos de ciclagem de nutrientes nos agroecossistemas canavieiros.

Por outro lado, as menores atividades enzimáticas nas camadas mais profundas podem ser atribuídas à limitação de substrato e oxigênio, o que restringe o desenvolvimento e a atividade dos microrganismos.

No entanto, ao considerar os sistemas de preparo do solo, os efeitos dos preparos de solo realizado antes do plantio da cana-de-açúcar podem ter sido neutralizados pelas operações de cultivo, equiparando os diferentes tipos de preparo de solo, devido à compactação progressiva ao longo das safras (Cherubin et al., 2021; Jimenez et al., 2021; Oliveira et al., 2022), influenciado pelo intenso tráfego de máquinas pesadas durante o ciclo produtivo, principalmente durante a colheita mecanizada (Carvalho et al., 2011; Esteban et al., 2019; Guimarães Júnnyor et al., 2019).

A avaliação da sustentabilidade a longo prazo de práticas de manejo requer estudos prolongados que permitam a comparação com cenários de uso pré-existent (Hickmann et al., 2011). A complexa interação entre o manejo e a estrutura do solo, ilustrada pela variabilidade temporal observada em cultivos de milho e soja (Ellsworth et al., 1991), ressaltam que tal influência das práticas de manejo sobre a estrutura do solo é complexa e requer amostragem durante vários ciclos.

Os resultados da matriz de correlação evidenciam um comportamento integrado dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, no qual a fertilidade química e o aporte de carbono orgânico apresentaram associações consistentes com os indicadores microbiológicos.

Em particular, os maiores teores de COS, bem como a maior disponibilidade de bases trocáveis e a redução da acidez, mostraram correlações positivas com a biomassa microbiana e com a atividade enzimática, indicando que esses atributos compartilham condições edáficas comuns favoráveis à atividade biológica.

No estudo conduzido por Franco (2023), a variável que apresentou a maior correlação positiva com o carbono da biomassa microbiana (CBM) em todos os experimentos avaliados, envolvendo diferentes estratégias de adubação, manejos convencionais e níveis de intensidade de pastejo em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), foi o quociente microbiano (qMIC), com coeficientes de correlação elevados (0,87; 0,92 e 0,82). Adicionalmente, o carbono orgânico total também apresentou associação positiva consistente com o CBM.

Comportamento semelhante foi observado no presente estudo, no qual o qMIC e o carbono orgânico exibiram correlações positivas com a biomassa microbiana. No entanto, diferentemente do trabalho de Franco (2023), não foi realizada distinção entre sistemas de preparo ou manejo do solo, sendo a análise baseada na correlação entre os atributos de forma generalizada.

Resultados convergentes aos obtidos no presente estudo foram reportados por Bresilla et al. (2025), no qual a aplicação da análise de correlação evidenciou associações consistentes entre atributos químicos do solo vinculados à fertilidade e à matéria orgânica. Nesse estudo, matéria orgânica, carbono orgânico total e nitrogênio total apresentaram correlações fortemente positivas ($r= 1,00$), evidenciando a elevada interdependência entre esses compartimentos químicos relacionados ao acúmulo e à ciclagem de nutrientes.

De modo análogo, a matriz de correlação deste trabalho revelou associações positivas entre o carbono orgânico e a matéria orgânica do solo com atributos químicos, tais como a capacidade de troca catiônica e a soma de bases, indicando que o incremento do carbono no solo está associado ao fortalecimento do complexo sortivo.

Ademais, a correlação positiva entre pH e Ca identificada por Bresilla et al., (2025) foi igualmente observada neste estudo, no qual o pH apresentou associações

positivas com soma de bases. Por sua vez, os autores observaram correlação negativa entre densidade do solo e os teores de carbono orgânico, nitrogênio e matéria orgânica.

Estudos recentes que empregaram análise de correlação de Pearson entre atributos físicos do solo demonstram relações sistemáticas entre densidade do solo e macroporosidade (Naghdi et al., 2023).

Por exemplo, a análise de Pearson relatada por autores que avaliaram propriedades físico-químicas mostrou coeficientes de correlação entre densidade do solo e macroporosidade, evidenciando uma associação estatística entre o adensamento do solo e a redução do volume de macroporos ($r = -0,954$), o que respalda a interpretação física da matriz de correlação deste estudo.

Importante destacar que essas interpretações se baseiam em análise de correlação, as quais descrevem padrões de associação e covariância entre os atributos, sem permitir a inferência de relações de causa e efeito.

Portanto, os resultados indicam que os atributos físicos, químicos e biológicos do solo respondem de maneira integrada as condições ambientais e as práticas de preparo, refletindo a interdependência dos processos edáficos, e não a ação isolada de um único fator sobre os demais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de preparo com baixa intensidade de perturbação do solo, especialmente o plantio Direto, o subsolador de arrasto + grade niveladora e a grade niveladora isolada, demonstraram superioridade na preservação da estabilidade química e microbiológica do solo.

Essa superioridade é fundamentada na manutenção dos estoques de carbono orgânico (EstC) e das bases trocáveis (cálcio e magnésio), refletindo-se em maiores valores de pH e saturação por bases (V%).

Fisicamente, esses preparos promoveram uma maior estabilidade estrutural, evidenciada por valores superiores de Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Índice de Floculação.

Esse comportamento indica que a menor mobilização preserva a matéria orgânica como agente cimentante essencial, reduzindo a susceptibilidade desse Latossolo de textura franco argilo-arenoso à erosão hídrica e ao selamento superficial.

No aspecto microbiológico, o Plantio Direto, Subsolador de Arrasto e a Grade Niveladora destacaram-se por manter maiores atividades das enzimas Beta-Glicosidase, Fosfatase e Arilsulfatase, garantindo a eficiência da ciclagem de carbono, fósforo e enxofre, especialmente na superfície do solo.

Embora a Grade Niveladora isolada induza indícios de um rearranjo estrutural, caracterizado por menor macroporosidade e maior resistência à penetração, tais alterações não atingiram níveis restritivos ao crescimento radicular da cana-de-açúcar, mantendo-se abaixo do limite crítico de 4 MPa.

Portanto, as implicações para a agricultura, especialmente no cultivo de cana-de-açúcar, são claras: estratégias de manejo que priorizam a conservação do solo e a manutenção da matéria orgânica devem ser incentivadas, uma vez que podem contribuir para a sustentabilidade e longevidade dos sistemas agrícolas em áreas com características edáficas semelhantes.

Este trabalho, conseqüente, contribui para a compreensão dos efeitos de diferentes manejos na qualidade do solo e produtividade da cana-de-açúcar, sendo uma base importante para futuras pesquisas que possam explorar de forma mais aprofundada os mecanismos subjacentes a esses resultados e ampliar a aplicação dos achados em diferentes contextos agronômicos.

6. CONCLUSÕES

Os sistemas de preparos Plantio sobre a palha, Subsolador de Arrasto + Grade Niveladora e Grade Niveladora, são mais eficientes na preservação da qualidade física, química e biológica do solo, sem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar, constituindo-se, portanto, em estratégias tecnicamente viáveis, em Latossolos Vermelho Distrófico de textura franco argilo-arenosa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, A.; NASIM, F. ul-H.; BATOOL, K.; BIBI, A. Microbial β -Glucosidase: Sources, Production and Applications. **J Appl Environ Microbiol**, v. 5, p. 31–46, 2017.
- AJI, B. D.; WIJAYANTO, N.; WASIS, B. Visual evaluation of soil structure (VESS) method to assess soil properties of agroforestry system in Pangalengan, West Java. **Journal Manajemen Hutan Tropika**, v.27, n.2, p.80-88, 2021.
- ALAGNA, V.; DI PRIMA, S.; RODRIGO-COMINO, J.; LOVINO, M.; PIRASTRU, M.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDÀ, A. The impact of the age or vines on soil hydraulic conductivity in vineyards in eastern Spain. **Water**, Basileia, v.10, n.14. 2017. p. .10.3390/w10010014.
- ALAKUKKU, L. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. **Soil and Tillage Research**, v. 37, n. 4, p. 211-222, 1996.
- ALLEN, D. E.; SINGH, B. P.; DALAL, R. C. Soil Health Indicators Under Climate Change: A Review of Current Knowledge. In: SINGH, B.; COWIE, A.; CHAN, K. (Org.). *Soil Health and Climate Change. Soil Biology*. 29. ed. Berlin: Springer, p. 25–45. 2011.
- ALMEIDA, A. C. D. S.; SANTOS, H. H.; BORTOLO, D. P.; LOURENTE, E. R.; CORTEZ, J. W.; OLIVEIRA, F. C. D. Soil physical properties and yield of soybean and corn grown with wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 843-848, 2018.
- ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Porosidade. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.a
- ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.b
- ALMEIDA, E. P. C.; SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. **Latossolo Vermelho – Amarelo**. EMBRAPA. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelho-amarelos>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2026.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVEZ, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. Uso de gesso agrícola. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.67-78.
- ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 33, n. 2, 2011.
- AMAMI, R.; IBRAHIMI, K.; SHER, F.; MILHAM, P.; GHAZOUANI, H.; CHEHAIBI, S.; HUSSAIN, Z.; IQBAL, H. M. N. Impacts of different tillage practices on soil water infiltration for sustainable agriculture. **Sustainability**, v.13, p.1-15, 2021.
- AMORIM, F. R. A competitividade dos sistemas de preparo do solo e plantio de cana-de-açúcar: Uma análise dos sistemas utilizados por fornecedores e usinas no estado de São Paulo. 2019. 164 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.
- ANACHE, J. A.; FLANAGAN, D. C.; SRIVASTAVA, A.; WENDLAND, E. C. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 622, p. 140-151, 2018.

- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient of CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil Biology & Biochemistry*. v. 10, p. 215-221, 1978.
- ANDRADE, A. P.; MAFRA, A. L.; PICCOLLA, C. D.; ALBUQUERQUE, J. A.; BERTOL, I. Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. *Ciência Rural*, v. 42, p. 814-21. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000013>
- ANDRADE, F. M. C. **Caderno dos microrganismos eficientes (E.M.):** Instruções práticas sobre uso ecológico e social do EM. 3a ed. Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Fitotecnia. 2020. 31 p.
- ANTUNES, F. A. F.; CHANDEL, A. K.; BRUMANO, L. P.; TERÁN HILARES, R.; PERES, G. F. D.; AYABE, L. E. S.; SORATO, V. S.; SANTOS, J. R.; SANTOS, J. C.; DA SILVA, S. S. A Novel process intensification strategy for second-generation ethanol production from sugarcane bagasse in fluidized bed reactor. *Renewable Energy*, Amsterdam, v.1, n.1, p.1-8, 2017.
- ARALDI, D. A., YAMASHITA, O. M., CARVALHO, M. A. C., CAMPOS, O. R., ROQUE, C. G., DALLACORT, R. Effect of sowing depth and presence of straw on the substrate in the emergence of *Crotalaria juncea*. *Ambiência*, Guarapuava, v.12, n.2, p. 525–538, 2016.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- ARAUJO-JUNIOR C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Load bearing capacity and critical water content of a Latossol induced by different managements. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 35, p.115-131, 2011.
- ARCOVERDE, S. N. S. Atributos físicos e desempenho de cultivares de cana-de-açúcar em um latossolo vermelho distroférrico submetido a dois sistemas de preparo. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados: UFGD, 2018. 136f.
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; NAGAHAMA, H. J.; MAUAD, M.; ARMANDO, E. J.; CORTEZ, J. W. Growth and sugarcane cultivars productivity under no-tillage and reduced tillage system. *Revista Ceres*, v.66, n.3, p.168-177, 2019.
- ARCOVERDE, S.N.S.; SOUZA, C.M.A.; ORLANDO, R.C.; SILVA, M.M.S.; NASCIMENTO, J.M. Crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar em plantio de inverno sob preparos conservacionistas do solo. *Revista Engenharia na Agricultura*, v.27, p.142-156, 2019.
- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. Colombo: **Embrapa Floresta**, 2002. 41p.
- ARRUDA, A. B.; SOUZA, R. F.; BRITO, G. H. M.; MOURA, J. B.; OLIVEIRA, M. H. R.; SANTOS, J. M.; SILVAS, D. Resistance of soil to penetration as a parameter indicator of subsolation in crop areas of sugar cane. *Scientific Reports*, v.11, p.1-9, 2021.
- ARRUDA, E. M.; ALMEIDA, R. F.; DOMINGUES, L. A. S.; SILVA JUNIOR, A. C.; MORAES, E. R.; BARROS, L. R.; SOUSA, J. L. O.; LANA, R. M. Q. Soil porosity and density in sugarcane cultivation under different tillage systems. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, n.30, p.2689-2696, 2016.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. Tradução de H. R. Gheyi, J. F. de Medeiros e F. A. V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. – LIVRO

- BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174-2181, 2010.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). Relatório Síntese 2025: ano base 2024. 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao885/tópico767/BEM_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2025.
- BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; HUNGRIA, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 641-649, 1997.
- BANGITA, B.; RAO, B. K. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma*, v.189-190, n.1, p.351-356, 2012.
- BAQUERO, J.E.; RALISCH, R.; CONTI, M.; TAVARES FILHO, C.; GUIMARÃES, M. F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.1, p.63-70, 2012.
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.195, p.1-11, 2019. DÓI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>
- BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, v.13, p.15-25, 2018.
- BARBOSA, L. C.; TENELLI, S.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CASTIONI, G. A. F.; NETO, J. R.; CARVALHO, J. L. N. Linking soil physical quality to shoot and root biomass production in scenarios of sugarcane straw removal. **European Journal of Agronomy**, v.152, p.1-10, 2024.
- BECK-BROICHSITTER, S.; RUTH, S.; SCHRÖDER, R.; FLEIGE, H.; GERKE, H. H.; HORN, R. Simultaneous determination of wettability and shrinkage in an organic residue amended loamy topsoil. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 68, n. 2, p. 111-118, 2020.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.34, n.3, p.681-691, 2010.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J. D.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 155-163, 2004.
- BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; MAFRA, Á. L.; FLORES, M. C. Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1918-1928, 2014.
- BETANCUR-CORREDOR, B.; LANG, B.; RUSSELL, D. J. Reducing tillage intensity benefits the soil micro- and mesofauna in a global meta-analysis. *European Journal of Soil Science*, v.73, n.6, e13321, 2022.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.
- BEUTLER, A.; BEUTLER, A. N.; MUNARETO, J. D.; GRECO, A. M. F.; POZZEBON, B. C.; GALON L, GUIMARÃES, S.; BURG, G.; SCHMIDT, M. R.; DEAK, E. A.; GIACOMELI, R.; ALVES, G. S. Soil tillage, rice straw and flooded irrigated rice yield. **Semin-Cienc Agrar.**, v.35, p. 1153-1162, 2014. DÓI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n3p1153>

- BIBERDZIC, M.; BARAC, S.; LALEVIC, D.; DJIKIC, A.; PRODANOVIC, D.; RAJICIC, V. Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. **Chilean journal of agricultural research**, v. 80, n. 1, p. 80-89, 2020.
- BINI, D.; SANTOS, C. A.; BERNAL, L. P. T.; ANDRADE, G.; NOGUEIRA, M. A. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ultisol under different tillage and uses in winter. **Applied Soil Ecology**, v. 76, p. 95-101, 2014.
- BLANCO H, LAL R. Soil resilience and conservation. In: BLANCO, H.; LAL, R. Principles of soil conservation and management. Springer Science Business Media, p.15-33, 2010.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Soil resilience and conservation. BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. (Eds.). Principles of soil conservation and management. Columbus: Springer Science Business Media BV, 2010, p.15-33.
- BOLENHEZI, D.; VISCHI FILHO, O. J.; IVO, W. P. M.; VITTI, A. C.; BOLONHEZI, A.C.; BRANCALIAO, S. R. XXXIII – Manejo e conservação do solo em cana-de-açúcar. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. **Manejo e conservação do solo e da água**. Viçosa, MG: SBCS, 2019. 1355p.
- BOLONHEZI, D. Plantio direto e calagem na reforma de cana crua. **A Granja**. v.769, p. 75–77. 2013.
- BORDONAL, R. D. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA JR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agron. Sustentar*, v. 38, p. 13, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>
- BORGES, L. A. B. Atributos químicos, acúmulo de carbono e nitrogênio e nutrição da cana-de-açúcar orgânica em Latossolo de Cerrado. 2013. 129 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- BRADY, N.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRAUNACK, M.V.; McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil and Tillage Research**, v.89, n.1, p.86-102, 2006.
- BRESILLA, B.; ZOGAJ, M.; SZEGI, T. A.; XHEMALI, B.; GJINOVCI, G.; RACAJ, F.; HUSAJ, Z. Effect of pine afforestation on soil physicochemical properties compared to pasture land: A case study in Kosovo. **Journal of Forest Science**, v. 71, n. 12, p. 589-598, 2025.
- BUHLER, D. D. Influence of tillage systems on weed population dynamics and management in corn and soybean in the central USA. **Crop Science**, v.35, n.5, p.1247-1258, 1995.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018.
- CABRAL, M. C. M.; CARVALHO, L. A.; NOVAK, E.; SCHICARELLI, C. D. S. Sistema de preparo de solo em área de reforma de canavial e as alterações físicas do solo. **Agrarian**, v. 8, n. 30, p. 376-386, 2015.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2ed. 2009. (IAC, Boletim técnico, 106).
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; IWATA, B. F.; NÓBREGA, J. C. A. Open-access Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.46, n.12, p.1681-1689, dez. 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pab/a/qNxRwCz9BzVwcmP3qFZhCdp/?lang=pt>>. Acesso em: 28 de novembro de 2025.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação de matéria orgânica. In: RAIJ, B. van et al. (Org.). *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. São Paulo: Instituto Agrônomo Campinas, p. 173–180. 2001.

- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATOS JÚNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2022, 489p. (IAC, Boletim Técnico, 100).
- CARDOSO, E. J. B. N. et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. *Scientia Agricola*, v.70, p.274-289, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>. Acesso em: 09 de setembro de 2024.
- CAREFOOT, J. M.; LINDWALL, C. W.; NYBORG, M. Tillage-induced soil changes and related grain yield in a semi-arid region. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 70, n. 2, p. 203-214, 1990.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. D.; REIS, E. F. D.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. D. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 147-157, 2009.
- CARPANEZ, T. G.; MOREIRA, V. R.; ASSIS, I. R.; AMARAL, M. C. S. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. **Science of The Total Environment**, v. 832, p. 154998, 2022.
- CARVALHAIS, N., FORKEL, M., KHOMIK, M., BELLARBY, J., JUNG, M., MIGLIAVACCA, M.; MU, M.; SAATCHI, S.; SANTORO, M.; THURNER, M.; WEBER, U.; AHRENS, B.; BEER, C.; CESCATTI, A.; RANDERSON, J. T.; REICHSTEIN, M. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, v. 514, n. 7521, p. 213-217, 2014.
- CARVALHO, J. L. N.; HUDIBURG, T. W.; FRANCO, H. C. J.; DELUCIA, E. H. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. *Global Change biology Bioenergy*, v.9, n.8, p.1333-1343, 2017b.
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S, BORDONAL, R. O.; BORGES, R. O.; CANTARELLA H., FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Glob Change Biol Bioenergy**, Chicago, v.9, n.7, p.1181-1195, 2017.
- CARVALHO, L.A., SILVA JUNIOR, A.C., NUNES, W.A.G.A., MEURER, I., SOUZA JUNIOR, W.S. Produtividade e Viabilidade econômica da Cana-De-Açúcar Em Diferentes Sistemas De Preparo Do Solo No Centro-Oeste Do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, P. 199 – 211, 2011.
- CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi approach assessment. *Soil and Tillage Research*, v.184, p.301-309, 2018.
- CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; ROLIM, M. M.; CARVALHO, J. L. N. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. *Soil and Tillage Research*, v.213, p.1-10, 2021.
- CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, v. 370, p. 114353, 2020.
- CELIK, I.; GUNAL, H.; BUDAK, M.; AKPINAR, C. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 236-243, 2010.
- CERRI, C. C., GALDOS, M. V., MAIA, S. M. F., BERNOUX, M., FEIGL, B. J., POWLSON, D. S. AND CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. *European Journal of Soil Science*, v.62, n.1, p.23-28, 2011.
- CHALLINOR, A. J.; WATSON, J.; LOBELL, D. B.; HOWDEN, S. M.; SMITH, D. R.; CHHETRI, N. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature climate change*, v. 4, n. 4, p. 287-291, 2014.

- CHAMEN, W. C. T.; MOXEY, A. P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P. D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, v.146, p.10-25, 2015.
- CHAPPELL, A.; BALDOCK, J.; SANDERMAN, J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 2, p. 187-191, 2016.
- CHAVEIRO, A. C. e et al. Qualidade física e química do solo em sistema de plantio direto cultivado com hortaliças – Uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, p. e32711931564, 2022.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, M. L.; RODRIGUES, M. Saúde do solo: entendendo os conceitos, relevância e suas aplicações na agricultura e meio ambiente. *Informações agronômicas: Nutrição de plantas*, NPCT, nº 18. Junho de 2023. p. 15-23.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, M. L.; RODRIGUES, M. Saúde do solo: entendendo os conceitos, relevância e suas aplicações na agricultura e meio ambiente. **Informações agronômicas Nutrição de plantas**, n. 18, p. 15-23, 2023.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCHI, M. R. A.; LIMA, R. P.; MORAES, M. T.; LUZ, F. B. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. **Soil and Tillage Research**, v.212, p.1-8, 2021.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P, FRANCO, A. L. C.; TOMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **Plos One**, São Francisco, v.11, n.3, p.1-26, 2016c.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L.; CERRI, C. E.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, v. 80, n. 1, p. 215-226, 2016b.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v. 267, p. 156-168, 2016a.
- CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. Saúde do solo: Múltiplas perspectivas e percepções. 1. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. v. 1. 126 p.
- CLAASSEN, R.; BOWMAN, M.; McFADDEN, J.; SMITH, D.; WALLANDER, S. Tillage intensity and conservation cropping in the United States. USDA, Economic Research Service EIB-197, 2018.
- COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale, NJ, Erlbaum. 1988.
- COLOMBI, T.; BRAUN, S.; KELLER, T.; WALTER, A. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 1283-1293, 2017.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2025/26 – terceiro levantamento. Brasília: CONAB, v.13, n.3, 2025.
- CONAB. Boletim da Safra de Cana-de-açúcar. Safra 2024/25 – Primeiro levantamento, Brasília. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-decana-de-acucar/item/download/52866_debcad81732c056406e505847b2c45de. Acesso em: 25/04/2024.
- CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 10, p. 1301–1309, 2011.
- CONTE, O.; WESP, C. D. L.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; LEVIEN, R.; NABINGER, C. Densidade, agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 579-587, 2011.
- CORWIN, D. L. et al. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma*, v. 114, n. 3–4, p. 231–259, 2003.
- COTRIM, C. F. C. et al. Qualidade do solo: relevância e uso de indicadores para o monitoramento. *Revista Agrotecnologia*, v. 13, n. 2, 2022.

- COUTO, R.F.; REIS, E.F.; VIANA, P.M.F.; HOLTZ, V.; OLIVEIRA, L.A.; ALVES, S.M.F. Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1239-1245, 2013.
- CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1929–1938, nov. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600027>
- DANTAS, J. O. et al. Artrópodes e microbiota do solo em sistema agroecológico de produção no semiárido nordestino. *Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável*. Guarujá, SP: Científica Digital, v. 2. p. 267–281. 2021.
- DE ANDRÉA, A. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.
- DE VARES ROSSETTI, K.; TEIXEIRA, D. D. B.; REIS, I. M. S.; CENTURION, J. F. Agregação de um Latossolo em função de diferentes ciclos de cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Agroambiente**, v. 8, n. 1, p. 10-17, 2014.
- DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Lei nº 11.241, de 19/02/2002. 2002.
- DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A.J.; DUIKER, S.W.; REICOSKY, D.C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C. M.; WEISS, K. Why do we need to standardize no-tillage research? **Soil Till Res.**, v.137, p.16–22. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.002>
- DERPSCH, R.; KASSAM, A.; REICOSKY, D.; FRIEDRICH, T.; CALEGARI, A.; BASCH, G.; SANTOS, D. R. Nature's laws of declining soil productivity and Conservation Agriculture. **Soil Security**, v. 14, p. 100127, 2024.
- DICK, R.P. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. **Soil Sci. Soc. Am.**, v. 48, p. 569-574, 1984.
- DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; Argila dispersa em água e grau de flocculação. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America, p. 77, 1994.
- DORAN, J. W.; JONES, A. J. Methods for assessing soil quality. Madison: Soil Science Society of America, 1996. 410 p.
- DUARTE FILHO, J. B.; COELHO, F. C. Avaliação de atributos químicos do solo após a colheita da cana-planta em sistema de plantio direto e convencional. **Científica**, v. 38, n. 1/2, p. 70-78, 2010.
- DURIGAN, M. R.; CHERUBIN, M. R.; DE CAMARGO, P. B.; FERREIRA, J. N.; BERENQUER, E.; GARDNER, T. A.; CERRI, C. E. P. Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the Eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 9, n. 3, p. 379, 2017.
- EIVAZI, F., & TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988.
- EIVAZI, F., & TABATABAI, M. A. Phosphatases in soils. **Soil biology and biochemistry**, v.9, n. 3, p. 167-172, 1977.
- ELHAKEEM, M.; PAPANICOLAOU, A. N. T.; WILSON, C. G.; CHANG, Y.; BURRAS, L.; ABBAN, B.; WYSOCKI, D. A.; WILLS, S. Understanding saturated hydraulic conductivity under seasonal changes in climate and land use. **Geoderma**, v. 315, p. 75-87, 2018.
- ELLSWORTH, T. R.; CLAPP, C. E.; BLAKE, G. R. Temporal variations in soil structural properties under corn and soybean cropping. **Soil Science**, v. 151, n. 6, p. 405-416, 1991.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

- ESTADOS UNIDOS, SOIL SURVEY STAFF. Soil Survey Manual. Washington, D.C: Department of Agriculture. **Soil Conservation Service**, 437p. (USDA. Agriculture Handbook, 18) 2aed. 1993.
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; SOUZA LIMA, E.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v. 362, p. 97-114, 2020.
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; GOMES, M. G. S.; PARRA, J. A. S.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; MORAES, M. T. Risk assessment of soil compaction due to machinery traffic used in infield transportation of sugarcane during mechanized harvesting. *Soil and Tillage Research*, v.244, p.1-11, 2024.
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; SOUZA LIMA, E.; OLIVEIRA, I. N.; PAULA RIBEIRO, N. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 60-71, 2019.
- FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Chapter Six - Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. *In: SPARKS, D. L. Advances in Agronomy. Academic Press*, v. 128, p. 221-275, 2014.
- FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. D.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. D.; CARNEIRO, M. P.; LA SCALA JR, N. Abiotic soil health indicators that respond to sustainable management practices in sugarcane cultivation. *Sustainability*, v. 12, n. 22, p. 9407, 2020.
- FENG, Y.; WANG, J.; LIU, T.; BAI, Z.; READING, L. Using computed tomography images to characterize the effects of soil compaction resulting from large machinery on three-dimensional pore characteristics in an opencast coal mine dump. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 3, p. 1467-1478, 2019.
- FERREIRA, E. A.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A.; VAZ, B. K. M.; KERKHOFF, P. H. A. Hydraulic conductivity of a Latosol in different soil use and management systems. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e384111638010, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i16.38010
- FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.
- FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G., BALIEIRO, F. C., MOURA, T. P. A., MENEZES, A. R., SANTANA, C. I. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1457-1465, 2016.
- FONTANA, A.; BRITO, R. J.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A. Índices de agregação e a relação com as substâncias húmicas em Latossolos e Argissolos de tabuleiros costeiros, Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 3, p. 291-297, 2010.
- FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. C.; SALTON, J.C.; TOMAZ, M.; MENEGHINI, V.; SANTOS, F. M.; DEBIASE, H. I.; ALVES, B. J. R. Quantificação do carbono e granulometria do solo na agricultura de baixo carbono. *In: FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. C. Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 30p.
- FRANCIOLI, D.; SCHULZ, E.; LENTENDU, G.; WUBET, T.; BUSCOT, F.; REITZ, T. Mineral vs. Organic Amendments: Microbial Community Structure, Activity and Abundance of Agriculturally Relevant Microbes Are Driven by Long-Term Fertilization Strategies. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, p. 1446, 2016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446>
- FRANCO, A. J. **Indicadores de qualidade do solo em diferentes manejos de sistemas integrados de produção agropecuária em diferentes biomas**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023. 95 p.

- FRASER, T. D.; LYNCH, D. H.; GAIERO, J.; KHOSLA, K.; DUNFIELD, K. E. Quantification of bacterial non-specific acid (phoC) and alkaline (phoD) phosphatase genes in bulk and rhizosphere soil from organically managed soybean fields. *Applied Soil Ecology*, v. 111, p. 48–56, 2017.
- FREITAS, L., DE OLIVEIRA, I. A., SILVA, L. S., FRARE, J. C. V., FILLA, V. A., & GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências**, v. 26, n. 1-2, 2017.
- FUENTES-LLANILLO R.; TELLES, T. S.; JUNIOR, D. S.; MELO, T. R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 208, p. 104877, 2021.
- GAO, H.; ZHANG, X.; AN, R.; WANG, G.; LIU, X.; LEI, X. Compaction, compression, and hydraulic characteristics of micaceous residual soil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 83, n. 2, p. 57, 2024.
- GERIS, J.; VERRROT, L.; GAO, L.; PENG, X.; OYESIKU-BLAKEMORE, J.; SMITH, J. U.; HODSON, M. E.; MCKENZIE, B. M.; ZHANG, G.; HALLETT, P. Importance of short-term temporal variability in soil physical properties for soil water modelling under different tillage practices. *Soil and Tillage Research*, v.213, p.1-10, 2021.
- GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.863-873, 2007.
- GITHONGO, M. W.; KIBOI, F. K.; MUSAFIRI, C. M.; MURIUKI, A.; FLIESSBACH, A. The effect of minimum tillage and animal manure on maize yields and soil organic carbon in sub-Saharan Africa: A meta-analysis. *Environmental Challenges*, v.5, p.1-9, 2021.
- GOMES, J.; BAJAY, M. M. Economicidade da idade de reforma de canaviais. *Revista IPecege*, v.3, n.3, p.9-22, 2017.
- GOMES, T. F.; VAN DE BROEK, M.; GOVERS, G.; SILVA, R. W.; MORAES, J. M.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A. Runoff, soil loss, and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach. *Catena*, v. 181, p. 104083, 2019.
- GRANDE, L. H. Q.; SANTOS, J. K.; PEREIRA, M. B. N.; SILVA, L. H. A.; MUNIZ, L. F.; BOLONHEZI, D.; MORAES, M. T. Modelling sugarcane root elongation in response to mechanical stress as an indicator of soil physical quality. **Experimental Agriculture**, v. 61, p. e3, 2025.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. D. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; LIMA, C. C. D.; VITTI, A. C.; FIGUEIREDO, G. C.; DECHEN, S. C. F. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 6, p. 509-517. 2019a.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. D. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the total environment**, v. 681, p. 424-434, 2019b.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: efeitos do tráfego e de sistemas de manejo. Programa de Pós-Graduação do Instituto Agrônomo de Campinas (Tese de Doutorado). 2018.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DISERENS, E.; SEVERIANO, E. C.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. **Industrial Crops and Products**, v. 177, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114532>.
- GUIMARÃES, R. M. L.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.6, p.1512-1521, 2013.

- GUO, L.; ZHANG, L.; LIU, L.; SHENG, F.; CAO, C.; LI, C. Effects of long-term no tillage and straw return on greenhouse gas emissions and crop yields from a rice-wheat system in central China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.322, p.1-9, 2021.
- HARRIS, J.; EVANS, D. L.; MOONEY, S. J. A new theory for soil health. *European Journal of Soil Science*, v. 73, n. 4, e13292, 2022.
- HARUNA, S. I., ANDERSON, S. H., NKONGOLO, N. V.; ZAIBON, S. Soil hydraulic properties: Influence of tillage and cover crops. *Pedosphere*, v. 28, n. 3, p. 430-442, 2018.
- HAZELTON, P.; MURPHY, B. Interpretando os resultados dos testes de solo: o que significam todos esses números. 2007.
- HE, D.; LU, C.; TONG, Z.; ZHONG, G.; MA, X. Research progress of minimal tillage method and machine in China. *AgriEngineering*, v.3, p.633-647, 2021.
- HE, Y.; GAO, Y.; LI, X.; CHEN, J.; YANG, J.; CHEN, J.; CAI, C. Influence of gully erosion on hydraulic properties of black soil-based farmland. *Catena*, v. 232, p. 107372, 2023.
- HICKMANN, C.; COSTA, L. M. D.; SCHAEFER, C. E. G.; FERNANDES, R. B. A. Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos de longa duração e Mata Atlântica secundária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 2191-2198, 2011.
- HINSINGER, P. et al. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant physiology*, v. 156, n. 3, p. 1078-1086, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175331>
- HOREL, A., TÓTH, E., GELYBÓ, G., KÁSA, I., BAKACSI, Z.; FARKAS, C. Effects of land use and management on soil hydraulic properties. *De Gruyter – Open Geosciences*, v.7, p. 742-754, 2015. .10.1515/geo-2015-0053
- HUSSAIN, R.; RAVI, K.; GARG, A. Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures. *Soil and Tillage Research*, v. 204, p. 104713, 2020.
- IAC – Instituto Agronômico de Campinas. Solos do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento. 2014. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>>. Acesso em: 01 de janeiro de 2025.
- IBGE. **Portal de mapas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa223774>>. Acesso em: 24 de abril de 2025.
- IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Mapa de Solos de Minas Gerais**. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/api/records/365b8a86-6ecd-474b-ae20-30efac6107a8>. Acesso em: 02 abr. 2026.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.; DIAS JUNIOR, M. D. S.; TORMENA, C. A. Quantifying critical pressures for plant growth. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p. 11-18, 2001.
- INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, v. 15, n. 4, p. 177-188, 1988.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, v. 79, n. 1, p. 9-16, 2000.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 55, p. 69-78, 2000.
- JAKELAITIS, A.; SILVA, A.A.; SANTOS, J.B. & VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.38, p.118- -127, 2008.

- JANES-BASSETT, V.; BLACKWELL, M. S.; BLAIR, G.; DAVIES, J.; HAYGARTH, P. M.; MEZELI, M. M.; STEWART, G. A meta-analysis of phosphatase activity in agricultural settings in response to phosphorus deficiency. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 165, p. 108537, 2022.
- JANZEN, H. H.; JANZEN, D. W.; GREGORICH, E. G. The 'soil health' metaphor: Illuminating or illusory? *Soil Biology and Biochemistry*, v. 159, e108167, 2021.
- JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover. *In*: PAUL, E. A.; LADD, J. M. **Soil biochemistry**, v.5, p.415-471, 1981.
- JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P.; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.206, p.1-10, 2021.
- KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 4–10, 1997.
- KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v.194, p.1-12, 2019.
- KRAEMER, F. B.; MORRÁS, H.; FERNÁNDEZ, P. L.; DUVAL, M.; GALANTINI, J.; GARIBALDI, L. Influence of edaphic and management factors on soils aggregates stability under no-tillage in Mollisols and Vertisols of the Pampa Region, Argentina. *Soil and Tillage Research*, v. 209, p. 104901, 2021.
- KRAMER, C.; GLEIXNER, G. Soil organic matter in soil depth profiles: distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 2, p. 425-433, 2008.
- KUNDE, R. J.; LIMA, C. L. R. D.; SILVA, S. D. D. A. E.; PILLON, C. N. Tensile strength, friability, aggregation, and soil organic matter physical fractions of an Oxisol cultivated with sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 04, p. 487-494, 2018.
- LAL, R. Rights-of-soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 74, n. 4, p. 81A-86A, 2019. Doi:10.2489/jswc.74.4.81^a
- LAL, R. Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P. Transmission of vertical stress in a real profile. Part I: Site description, evaluation of the Sohne model, and effect of topsoil tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 114, p. 57-70, 2011.
- LAMBERS, H.; FINNEGAN, P. M.; JOST, R.; PLAXTON, W. C.; SHANE, M. W.; STITT, M. Phosphorus nutrition in Proteaceae and beyond. **Nature plants**, v. 1, n. 8, p. 1-9, 2015.
- LASKAR, S. Y.; SILESHI, G. W.; PATHAK, K.; DEBNATH, N.; NATH, A. J.; LASKAR, K. Y.; SINGNAR, P.; DAS, A. K. Variations in soil organic carbon content with chronosequence, soil depth and aggregate size under shifting cultivation. *Science of the Total Environment*, v. 762, p. 143114, 2021.
- LAURETO, L. M. O.; CIANCIARUSO, M. V.; SAMIA, D. S. M. Functional diversity: an overview of its history and applicability. *Natureza & Conservação*, v. 13, n. 2, p. 112–116, 2015.
- LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002. 58p. (Dissertação de Mestrado).
- LEHMANN, J.; BOSSIO, D. A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RILLIG, M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 10, p. 544–553, 2020.
- LEME FILHO, J. R. A. Artigo: benefícios decorrentes do aumento da longevidade dos canaviais. Embrapa: Agroenergia. 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/78112275/artigo-beneficios-decorrentes-do-aumento-da-longevidade-dos-canaviais>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

- LI, C.; VEUM, K. S.; GOYNE, K. W.; NUNES, M. R.; ACOSTA-MARTINEZ, V. A chronosequence of soil health under tallgrass prairie reconstruction. *Applied Soil Ecology*, v. 164, p. 103939, 2021.
- LI, L.; LI, J.; WEI, C.; YANG, C.; ZHONG, S. Effect of mechanized ridge tillage with rice-rape rotation on paddy soil structure. *Agriculture*, v.12, p.1-12, 2022.
- LI, Q.; CAI, Q.; PAN, L.; TANG, X.; LING, G.; WEI, Y.; LI, X.; YANG, S. Changes in the microbiome of sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrids.) rhizosphere in response to manganese toxicity. *Life*, v. 13, n. 10, p. 1956, 2023.
- LIBARDI, P. L. Água no solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). Física do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., p. 103-152, 2010.
- LIMA, C. C.; DE MARIA, I. C.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; FIGUEIREDO, G. C.; DECHEN, S. C. F.; BOLONHEZI, D. Root parameters of sugarcane and soil compaction indicators under deep strip tillage and conventional tillage. **Scientific Reports**, v.12, p.1-11, 2022.
- LIMA, R. P. D.; KELLER, T.; GIAROLA, N. B.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R. D.; ROLIM, M. M. Measurements and simulations of compaction effects on the least limiting water range of a no-till Oxisol. **Soil Research**, v. 58, n. 1, p. 62-72, 2020.
- LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; TOLEDO, M. P.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R.; SILVA, I. A. C.; PEDROSA, E. M. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105215, 2022.
- LIRA, R. M.; SILVA, E. F.F.; BARROS, M. S.; GORDIN, L. C.; WILLADINO, L. G.; BARBOSA, R. F. Water potential and gas exchanges in sugarcane irrigated with saline waters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, p. 679-682, 2018. DÓI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p679-682>
- LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores Microbianos de Qualidade do Solo em Diferentes Sistemas de Manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 45-55, 2012. DÓI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100004>
- LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CERRI, C. C.; SATIRO, L. S.; WIENHOLD, B. J.; SCHMER, M. R.; JIN, V. L.; CERRI, C. E. P. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. *Industrial Crops and Products*, Amsterdam, v.111, p.794-806, 2018.
- LIU, B.; XIA, H.; JIANG, C.; RIAZ, M.; YANG, L.; CHEN, Y.; FAN, X.; XIA, X. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China. **Science of the Total Environment**, v. 841, p. 156608, 2022.
- LIU, C.; HE, C.; CHANG, S. X.; CHEN, X.; AN, S.; WANG, D.; YAN, J.; ZHANG, Y.; LI, P. Fertilization and tillage influence on soil organic carbon fractions: A global meta-analysis. *Catena*, v. 246, p. 108404, 2024.
- LIU, H., WANG, Y., CAI, T., HE, K., TIAN, X., CHEN, Z., YIN, Y.; CUI, Z. Integrated management to achieve synergy in sugarcane production and quality in China. *Field Crops Research*, v. 317, p. 109552, 2024.
- LIU, J.; HU, F.; XU, C.; WANG, Z.; MA, R.; ZHAO, S.; LIU, G. Comparison of different methods for assessing effects of soil interparticle forces on aggregate stability. *Geoderma*, v. 385, p. 114834, 2021.
- LOCATELLI, J. L.; LIMA, R. P.; SANTOS, R. S.; CHERUBIN, M. R.; CREAMER, R. E.; CERRI, C. E. Soil strength and structural stability are mediated by soil organic matter composition in agricultural expansion areas of the Brazilian Cerrado Biome. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 71, 2022.
- LOPES, L. et al. Shifts in microbial and physicochemical parameters associated with increasing soil quality in a tropical Ultisol under high seasonal variation. *Soil and Tillage Research*, v.206, p.104819, 2021.
- LOPES, M. C.; TAQUES, F. H. O desafio da energia sustentável no Brasil. *Revista Cadernos da Economia*, Chapecó, v.20, n.36, p.71-96, 2016. Informação desatualizada

- LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; CEZESMUNDO FERREIRA GOMES; ADRIANO SOARES GASPARINI; NUNES, C. M. Atributos Microbiológicos, Químicos E Físicos De Solo Sob Diferentes Sistemas De Manejo E Condições De Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, 2011.
- LOVERA, L. H.; SOUZA, Z. M.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, I. N.; FARHATE, C. V.; LIMA, E. S.; PANOSSO, A. R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soi and Tillage Research**, v.208, p.1-12, 2021.
- LOZANO, N.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, S.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.129, p. 61-68, 2013.
- LUZ, F. B.; CARVALHO, M. L.; BORBA, D. A.; SCHIEBELBEIN, B. E.; LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R. Linking soil water changes to soil physical quality in sugarcane expansion areas in Brazil. **Water**, v.12, n.11, p.1-18, 2020.
- LUZ, F. B.; CARVALHO, M. L.; CASTIONI, G. A. F.; OLIVEIRA BORDONAL, R.; COOPER, M.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Soil structure changes induced by tillage and reduction of machinery traffic on sugarcane—A diversity of assessment scales. **Soil and Tillage Research**, v. 223, p. 105469, 2022.
- LUZ, F. B.; SILVA, V. R.; MALLMANN, F. J. K.; PIRES, C. A. B.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CHERUBIN, M. R. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 281, p. 100-110, 2019.
- LUZ, F. M. **Tempo de residência e estabilização do carbono em solos da Amazônia**. Dissertação (Mestrado). Manaus: INPA/UEA, Manaus, 2018. 55f.
- MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance: current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Division of ASCE**, Nova York, v. 103, p. 115-134, 1977. DÓI: <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>
- MACEDO, V. R. A. Atributos do solo que determinam a produtividade das culturas para prevenir a degradação de solos estruturalmente frágeis. 2018. Tese de Doutorado. UEMA.
- MANTOVANELLI, B. C. et al. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão. *Revista EduTec*, v. 3, n. 2, p. 87–100, 2022.
- MARASCA, I.; GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H.; BALLARIN, A. W.; GUERRA, S. P.; LANÇAS, K. P. Propriedades físicas de um Nitossolo Vermelho em função dos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p. 1160-1166, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001100005>
- MARASCA, I.; LEMOS, S.V.; SILVA, R B.; GUERRA, S.P.S.; LANÇAS, K.P. Soil Compaction Curve of an Oxisol under Sugarcane Planted after In-Row Deep Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.39, n.5, p.1490-1497, 2015.
- MARCATTO, F. S.; SILVEIRA, H.; FONTANA, A. C. Estabilidade de agregados dos solos em uma topossequência cultivada com cana-de-açúcar em Astorga-PR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 7, p. 3953-3967, 2021.
- MAREK, M. V.; MARKOVÁ, I.; PAVELKA, M.; HAVRÁNKOVÁ, K.; MACKU, J.; REJSEK, K.; JANOUS, D. **Potential changes in forest soil carbon stocks under different climate change scenarios**. In: PRASAD, M. N. V.; PIETRZYKOWSKI, M. (Ed.). *Climate change and soil interactions*. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- MARIN, F. R. **Árvore do Conhecimento: cana-de-açúcar. Solos do Brasil e a cana-de-açúcar**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília: Embrapa: Brasília. 2017. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html>. Acesso em: 01 de janeiro de 2025.

- MARIN, F. R. Cana: Fenologia. Embrapa, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas/fenologia>>. Acesso em: 01 de maio de 2024.
- MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. *Ecological applications*, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.
- MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J. P.; SILVA, P.; VALLE, S.; ACEVEDO, E. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 232-244, 2008.
- MARTINEZ-SALGADO, M. M. et al. Biological soil quality indicators: a review. *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology*, v. 1, n. 1, p. 319-328, 2010.
- MARTÍNI, A. F.; VALANI, G. P.; SILVA, L. F. S.; PAULA, S.; BOLONHEZI, D.; COOPER, M. Soil physical quality response to management systems in a long-term sugarcane trial. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 4, p. 1320-1334, 2024.
- MAUSEL, P. W. Soil quality in Illinois — an example of a soils geography resource analysis. *The Professional Geographer*, v. 23, n. 2, p. 127-136, 1971.
- MCCAULEY, A.; JONES, C.; OLSON-RUTZ, K. Soil pH and Organic Matter. **Montana State University Extension**. 2017. Disponível em: <<https://apps.msuxextension.org/publications/pub.html?sku=4449-8>>. Acesso em: 24 de novembro de 2025.
- MEINZER, F. C.; PLAUT, Z.; SALIENDRA, N.C. Carbon isotope discrimination, gas exchange and growth of sugarcane cultivars under salinity. **Plant Physiology**, n. 104, p. 521-526, 1994.
- MELERO, S.; VANDERLINDENA, K.; RUIZA, J.C. & MADEJONB, E. Long-term effect on soil biochemical status of a Vertisol under conservation tillage system in semi-arid Mediterranean conditions. **Europ. J. Soil Biol.**, n. 44, p.437-442, 2008.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 32, n. 1/2, p. 191-209, 2015.
- MERILES, J.M.; GIL, S.V.; CONFORTO, C.; FIGONI, G.; LOVERA, E.; MARCH, G.J. & GUZMÁN, C.A. Soil Microbial communities under different soybean cropping systems: Characterization of microbial populations dynamics, soil microbial activity, microbial biomass, and fatty acids profiles. *Soil Tillage Res.*, 103:271-281,2009.
- MESQUITA, M. G. B.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Revista Ciência Rural**, v.34, n.3, p. 963-969, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000300052>
- MINA, B.L.; SASHA, S.; KUMAR, N.; SRIVASTVA GUPTA, H.S. Changes in soil nutrient content and enzymatic activity under conventional and zero-tillage practices in a Indian sandy clay loam soil. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, v. 88, p. 273-281,2008.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European journal of soil science*, v. 69, n. 1, p. 39-47, 2018.
- MION, R. L.; HOLANDA, Á. S.; BARROSO, S. H. A.; SILVA, S. A. T. E. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 63-77, 2016.
- MOITINHO, M. R. et al. On the spatial and temporal dependence of CO emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum spp.*) production 2. *Soil and Tillage Research*, v. 148, p.127-132, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.012>.
- MOITINHO, M. R. et al. Short-Term Soil CO₂ Emission and Soil Attributes Under Contrasting Sugarcane Cultivars. **Sugar Tech**, v.20, p. 658-668, 2018.

- MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA JR, N. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1720-1728, 2013.
- MOMOLI, R. S. et al. Atributos morfológicos e físicos dos solos das trilhas turísticas da APA das nascentes do Rio Vermelho, Goiás. *Revista Formação*, v. 29, n. 54, p. 167–197, 2022.
- MONTAGNHAM, B. A.; SHIKIDA, P. F. A. Base econômica e desenvolvimento local: Estudo de caso múltiplo em município canavieiro. *Revista Economia e Desenvolvimento*, Recife, v.24, n.2, p.107-125, 2012.
- MOORBERG, C. J.; CROUSE, D. A. *Soils laboratory manual: K-state edition, version 2.0*. **New Prairie Press**, 2021.
- MORAES, E. R.; MAGESTE, J. G.; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R.; DOMINGUES, L. A. S.; LEMES, E. M.; LIMA, L. C. Sugarcane root development and yield under different soil tillage practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, e0180090, 2019.
- MORAES, M. T.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; BONETTI, J. A.; DEBIASI, H. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.53, n.4, p.464-477, 2018.
- MUHAMMAD, I.; KHAN, F. U.; KHAN, A.; WANG, J. Soil fertility in response to urea and farmyard manure incorporation under different tillage systems in Peshawar, Pakistan. *International Journal of Agriculture and Biology*, v.20, p.1539-1547, 2018.
- NAGAHAMA, H. D. J.; GRANJA, G. P.; CORTEZ, J. W.; RAMOS, R. L.; ARCOVERDE, S. N. S. Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agrônômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, v. 63, p. 741-746, 2016.
- NAGHDI, R.; SOLGI, A.; NIKOOY, M.; TAVANKAR, F.; MARCHI, E.; PICCHIO, R. Effects on soil physicochemical properties and seedling growth in mixed high forests caused by cable skidder traffic. **iForest**, v. 16, p. 127, 2023. DOI: 10.3832/ifor4103-016
- NANNIPIERI, P.; GIAGNONI, L.; LANDI, L.; RENELLA, G. Role of Phosphatase Enzymes in Soil. In: BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E., eds. *Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*. Springer, Berlin, p. 215–243, 2011.
- NKONGOLO, K. K.; NARENDRULA-KOTHA, R. Advances in monitoring soil microbial community dynamic and function. *Journal of Applied Genetics*, v. 61, n. 2, p. 249–263, 2020.
- OGURA, A. P.; DA SILVA, A. C.; CASTRO, G. B.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; DA SILVA, A. L. An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last two decades and its environmental impacts. *Sustainable Production and Consumption*, v. 32, p. 66-75, 2022.
- OLIVEIRA FILHO, F.X.; MIRANDA, N.O.; MEDEIROS, J.F.; SILVA, P.C.M.; MESQUITA, F.O.; COSTA, T.K.G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.19, n.2, p.186-193, 2015.
- OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P. Influência dos processos de recuperação do solo após mineração de carvão sobre a mesofauna edáfica em Lauro Müller, Santa Catarina, Brasil. *Biotemas*, v. 27, n. 2, p. 69, 2014.
- OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M.; BOLONHEZI, D.; TOTTI, M. C. V.; MORAES, M. T.; LOVERA, L. H.; LIMA, H. S.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-spouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105460>
- OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M.; LOVERA, L. H.; FARHATE, C. V. V.; LIMA, E. D. S.; ESTEBAN, D. A. A.; FRACAROLLI, J. A. Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. *Agricultural Water Management*, v.225, p.1-13, 2019.
- OLIVEIRA, K; J. B. de, LIMA, J. S. S. de; AMBRÓSIO, M. M. de Q.; BEZERRA NETO, F., e CHAVES, A. P. Propriedades nutricionais e microbiológicas do solo influenciadas pela adubação verde. *Revista de Ciências Agrárias*. v.40, n.1, Lisboa, mar. 2017.

- OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. The role of nitrogen fertilizers in sugarcane root biomass under field conditions. *Agricultural Sciences*, v.5, n.14, p.1527-1538, 2014.
- OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and Tillage Research*, v.117, n.1, p.201-210, 2011.
- PANDEY, V.; GAUTAM, P.; SINGH, A. P. Correlation between physical, chemical and biological properties of soil under different land use systems. *Int. J. Chem. Stud*, v. 7, p. 469-471, 2019.
- PANG, Z.; MO, L.; LIU, Q.; HUANG, Q.; XIAO, Y.; YUAN, Z. Soil acidification reduces flavonoids and key metabolites in sugarcane roots and rhizosphere leading to yield decline. *Rhizosphere*, v. 33, p. 101028, 2025.
- PANG, Z.; TAYYAB, M.; KONG, C.; LIU, Q.; LIU, Y.; HU, C.; HUANG, J.; WENG, P.; ISLAM, W.; LIN, W.; YUAN, Z. Continuous sugarcane planting negatively impacts soil microbial community structure, soil fertility, and sugarcane agronomic parameters. *Microorganisms*, v. 9, n. 10, p. 2008, 2021.
- PAPADOPOULOS, G.; MAVROEIDIS, A.; ROUSSIS, I.; KAKABOUKI, I.; STAVROPOULOS, P.; BILALIS, D. Evaluation of tillage & fertilization in *Carthamus tinctorius* L. using remote sensing. *Smart Agricultural Technology*, v.4, p.1-9, 2023.
- PARAHYBA, R. B. V.; ARAÚJO, M. S. B.; ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CALDAS, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.91, n.4, p.1-20, 2019.
- PEIXOTO, D. S.; SILVA, L. C. M.; MELO, L. B. B.; AZEVEDO, R. P.; ARAÚJO, B. C. L.; CARVALHO, T. S.; MORAIS, S. G.; CURI, N.; SILVA, B. M. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, v.745, p.1-14, 2020.
- PELUCO, R. G.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. D. B.; ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, n.6, p.661-672, 2013.
- PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; BARONI, M.; SCHNEIDER, I. T. Avaliação da Condutividade Hidráulica das Unidades Geológico-Geotécnicas de Santa Maria (RS) com a Utilização de Piezômetros. *Anuário do Instituto de Geociências –UFRJ*, v. 41, n. 1, p. 212-221, 2018. DÓI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_212_221
- PLAUT, Z.; MEINZER, F. C.; FEDERMAN, E. Leaf development, transpiration and ion uptake and distribution in sugarcane cultivars grown under salinity. *Plant Soil*, v. 218, p. 59-69, 2000.
- PORTUGUAL, A.F.; OSTA, A.D.V.; COSTA, L.M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da zona da mata mineira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, v.34, n.3, p. 575-585, 2010.
- POWLSON, D. S. Soil health — Useful terminology for communication or meaningless concept? Or both? *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, v. 7, n. 3, p. 246–250, 2020.
- POWLSON, D. S.; STIRLING, C. M.; JAT, M. L.; GERARD, B. G.; PALM, C. A.; SANCHEZ, P. A.; CASSMAN, K. G. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature climate change*, v. 4, n. 8, p. 678-683, 2014.
- QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; RAIJ, B. V.; OTTO, R.; PENATTI, C. P.; ROSSETTO, R.; VITTI, G. C.; KORNDORFER, G. H.; TRIVELIN, P. C. O.; MELLIS, E. V.; FRANCO, H. C. J.; GAVA, G. J. C.; VITTI, A. C.; DIAS, F. L. Cana-de-açúcar. *In*: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. **Boletim 100**: recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. 489 p.
- RAHMAN, M. A.; LEE, S. H.; JI, H. C.; KABIR, A. H.; JONES, C. S.; LEE, K. W. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. *International journal of molecular sciences*, v. 19, n. 10, p. 3073, 2018.

- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.
- RAMOS, M. E.; ROBLES, A. B.; SANCHEZ-NAVARRO, A.; GONZALEZ-REBOLLAR, J. L. Soil responses to different management practices in rainfed orchards in semiarid environments. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 1, p. 85-91, 2011.
- REICHARDT, K. A água na produção agrícola. São Paulo. Mc Graw-Hill. 1978. 120p.
- REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; RODRIGUES, M. F.; CAVALLI, J. P.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, v.165, p.345-357, 2018.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, v.102, n.2, p.242-254, 2009.
- REIS JUNIOR, F. B. Biomassa microbiana do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.
- REIS JUNIOR, F. B. dos et al. Uso de ferramentas moleculares em estudos da diversidade de microrganismos do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002.
- REIS, G. N.; CORTEZ, J. W. Preparo do solo em faixas na cultura da cana-de-açúcar: atributos físicos e desempenho operacional. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 1-15, 2024.
- REN, T.; TANG, S.; HAN, T.; WANG, B.; ZHOU, Z.; LIANG, G.; CAI, A. Positive rhizospheric effects on soil carbon are primarily controlled by abiotic rather than biotic factors across global agroecosystems. **Geoderma**, v. 430, p. 116337, 2023.
- RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, NE Brazil. *Plant and soil*, v. 281, n. 1, p. 339-351, 2006.
- RESENDE, H. C. **Calagem para manutenção da correção da acidez em solos sob plantio direto**. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021. 87 p.
- RESENDE, R. S.; CINTRA, F. L. D.; PACHECO, E. P.; AMORIM, J. R. A.; GOMES, R. S. B.; SILVA, S. M. Soil penetration resistance and sugarcane rooting under subsuperficial drip irrigation levels. *Sugar Tech*, v.24, p.1-12, 2022.
- REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, p.131-146, 2002.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. de F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência agrotécnica*, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.
- RINOT, O. et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of the Total Environment*, v. 648, p. 1484-1491, 2019.
- RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.
- RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2021.
- ROLDÁN, A.; SALINAS-GARCÍA, J.R.; ALGUACIL, M.M. & CARAVACA, F. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. **App. Soil Ecol.**, v. 30, p. 11-20, 2005.

- ROMERO, C. M.; HAO, X.; HAZENDONK, P.; SCHWINGHAMER, T.; CHANTIGNY, M.; FONTEYNE, S.; VERHULST, N. Tillage-residues affect mineral-associated organic matter on Vertisols in northern Mexico. *Geoderma Regional*, v.27, e00430, 2021.
- ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.821-828, 1999.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. D. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1529-1538, 2016.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Cana de açúcar: carreção e adubação. **AGEITEC**. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/correcao-e-adubacao>>. Acesso em: 27 de novembro de 2025.
- ROSSI NETO, J.; SOUZA, Z. M.; KÖLLN, O. T.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, D. A.; CASTIONI, G. A. F.; BARBOSA, L. C.; CASTRO, S. G. Q.; BRAUNBECK, O. A.; GARSIDE, A. L.; FRANCO, H. C. J. The arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. *Bioenergy Research*, v.11, n.2, p.291-304, 2018.
- ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, v. 70, p. 622-630, 2011.
- ROSSINI, D. B. **Resistencia mecânica à penetração em Latossolo Vermelho após sucessivos cortes mecanizados de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. Jaboticabal: UNESP, 2014.
- ROZEFF, N. Sugarcane and salinity: a review paper. **Sugar Cane**, v. 5, p. 8–19, 1995.
- SÁ, M.A.C.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; FRANZ, C.A.B.; REIN, T.A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1610-1622, 2016.
- SALL, N.S.; MASSE, D.; NDOUR, N.Y.B. & CHOTTE, J. Does cropping modify the decomposition function and the diversity of the soil microbial community of tropical fallow soil? **Appl. Soil Ecol.**, v. 31, p. 211-219, 2006.
- SALOMÃO, P. E. A.; KRIEBEL, W.; SANTOS, A. A.; MARTINS, A. C. E. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação e restauração de matéria orgânica. *Research, Society and Development*, v.9, n.1, e154911870, 2019.
- SALTON, J. C.; SILVA, W. M.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- SANTIAGO, A. D.; ROSSETO, R. Produção: calagem. EMBRAPA. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/correcao-e-adubacao/diagnose-das-necessidades-nutricionais/recomendacao-de-correcao-e-adubacao/calagem>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2026.
- SANTOS, J. G. Variabilidade pluviométrica na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba - MG. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.202>
- SANTOS, V. B. D.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. D. S.; SILVA, D. G. D. Biomassa, atividade microbiana e teores de carbono e nitrogênio totais de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrobiologia**, v. 10, n. 3, p. 333-338, 2004.
- SANTOS-BENEIT, F. The Pho regulon: a huge regulatory network in bacteria. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, p. 1–13, 2015.

- SAUVADET, M.; LASHERMES, G.; ALAVOINE, G.; RECOUS, S.; CHAUVAT, M.; MARON, P. A.; BERTRAND, I. High carbon use efficiency and low priming effect promote soil C stabilization under reduced tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 123, p. 64-73, 2018.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 882p.
- SCHJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L. J.; LYNGVIG, H. S.; NIELSEN, J. A. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently trafficked, temperate-region sandy loam soils. **Soil and Tillage Research**, v.163, p. 298-308, 2016.
- SCHLUTER, S.; GROBMANN, C.; DIEL, J.; WU, G.M.; TISCHER, S.; DEUBEL, A.; RÜCKNAGEL, J. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. *Geoderma*, v.332, p.10-19, 2018.
- SCHNEIDER, A.; MOLLIER, A. Modelling of K/Ca exchange in agricultural soils. **Geoderma**, v. 271, p. 216-224, 2016.
- SCHROEDER, H. F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p. Disponível em: <<https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Solos-Fatos-e-Conceitos-final-final-1-1.pdf>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2025.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; e WEED, S. B. Minerals in soil environments. 2 ed. Madison: **Soil Science Society of America**, 1989. p. 379 – 438.
- SEBEN JUNIOR, G. D. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. The effects of land use and soil management on the physical properties of an Oxisol in Southeast Brazil. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 38, p. 1245-1255, 2014.
- SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D. M. B. P.; SILVA, W. T. L.; SIMÕES, M. L.; CANTARELLA, H.; DE MARIA, I. C.; MARTIN-NETO, L. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 321–326, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500006N>
- SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, v. 2, p. 1–14, 2013.
- SHEN, R. F.; TENG, Y. The frontier of soil science: Soil health. *Pedosphere*, v. 33, n. 1, p. 6–7, 2023.
- SHUKLA, S. K.; JAISWAL, V. P.; SHARMA, L.; PATHAK, A. D.; SINGH, A. K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S. K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Sugarcane yield using minimum tillage technology through subsoiling: beneficial impact on soil compaction, carbon conservation and activity of soil enzymes. **Sugar Tech, New Delh**, v. 22, n. 6, p. 987-1006, 2020.
- SILVA JUNIOR, C.A.; CARVALHO, L.A.; CENTURION, J.F.; OLIVEIRA, E.C.A. Comportamento da cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo, sob diferentes tipos de preparo. *Bioscience Journal*, v.29, n.5, p.1489-1500, 2013.
- SILVA, A. S.; SILVA, I. D. F. D.; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. D. O.; SILVA, L. D. F. D. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência rural**, v. 44, n. 10, p. 1783-1789, 2014.
- SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). Comunicado Técnico 99. Embrapa, p. 1–4, 2007.
- SILVA, E. L.; SECCO, D.; MARINS, A. C.; MARINS, B. D.; CASTRO, M. B. S. Características físicas do solo e rendimento de grãos de milho em função de culturas de cobertura. **Research, Society and Development**, v. 11, n.1, 2022.
- SILVA, J. M.; ALBURQUERQUE, L. S. D.; SANTOS, T. M. C. D.; OLIVEIRA, J. U. L. D.; GUEDES, E. L. F. Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. **Revista Verde**, v. 8, n. 4, p. 132-135, 2013.

- SILVA, M. de O. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021.
- SILVA, M. L. N.; LIBARDI, P. L.; GIMENES, F. H. S. Soil water retention curve as affected by sample height. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, p. e0180058, 2018b.
- SILVA, M. P.; ARF, O.; SÁ, M. E.; ABRANTES, F. L.; BERTI, C. L. F.; SOUZA, L. C. D. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017.
- SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; BORBA, J. O. M.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J.; MARTINS, A. F. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.13, n.5, p.581-589, 2018a.
- SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; PEREIRA, W. E.; MARTINS, A. F.; ZONTA, J. H.; AMARAL, A. J.; TAVARES, D. D.; SILVA, A. J. Qualidade física de solo arenoso em ambiente semiárido sob sistema de integração Lavoura-Pecuária. **Bioeng**, v. 15, n. 4, p. 598-616, 2021.
- SILVA, R. B.; IORI, P.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, D. M. G.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência & Agrotecnologia**, v.40, n.3, p.265-278, 2016.
- SILVA, R. P.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; PEDROSA, E. M.; TAVARES, U. E.; SANTOS, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil and Tillage Research*, v.181, p.1-10, 2018.
- SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURTI, N.; ALIVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1585-1592, 2010.
- SILVA, S. D. A.; SIMON, E. D. T.; MONTEIRO, C. R. S.; ANTUNES, W. R.; HARTER, A. **Caracterização fenotípica da coleção de genótipos de cana-de-açúcar da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017. 43 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Clima Temperado, ISSN 167
- SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E.; WILLIAMS, S.; CERRI, C. C.; DAVIES, C. A.; PAUSTIAN, K. Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. *Plant and Soil*, v. 410, p. 483-498, 2017.
- SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; SALVIANO, A. M.; GUIMARÃES, M. J. M.; SILVA, J. S.; OLIVEIRA, C. R. S. Cultivo de cana-de-açúcar em áreas salinizadas: seleção de cultivares tolerantes e manejo de irrigação. In: CERQUEIRA, P. R. S.; LACERDA, C. F.; ARAÚJO, G. G. L.; GHEYI, H. R.; SIMÕES, W. L. (Orgs.). *Agricultura irrigada em ambientes salinos*. Brasília: Codevasf, 2021. Disponível em: <file:///C:/Users/Elen/Downloads/agricultura-irrigada-em-ambientes-salinos-2021.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- SOARES, R.; MADDOCK, J. E. L.; DE CAMPOS, D. V. B.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. D. A.; SANTELLI, R. E. Avaliação da estabilidade de agregados em marcadores ambientais terrestres do Antropoceno submetidos a diferentes períodos de pousio. **Revista Virtual de Química**. v.10, n. 6, p. 1-26, 2018.
- SOKOLOWSKI, A. C.; MCCORMICK, B. P.; GRAZIA, J.; WOLSKI, J. E.; RODRÍGUEZ, H. A.; FRERZ, E. P. R.; GAGEY, M. C.; DEBELISS, P.; PALADINO, I. R.; BARRIOS, M. B. Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina. *International Soil and Water Conservation Research*, v.8, p.185-194, 2020.
- SOUZA, A. C. M.; SOUZA, Z. M.; CLARET, R. M. P.; TORRES, J. L. R. Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, n. 1, 2017.

- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.72, n.3, p.270-277, 2015.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, n.1, p.135-146, 2014.
- SOUZA, J. L. B.; ANTONANGELO, J. A.; ZHANG, H.; REED, V.; FINCH, B.; ARNALL, B. Impact of long-term fertilization in no-till on the stratification of soil acidity and related parameters. *Soil and Tillage Research*, v.228, p.1-10, 2023.
- STAUT, L. A. Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar. 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm>. Acesso em: 01 de janeiro de 2025.
- STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.
- STEVENSON, F. J. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley & Sons, 1994.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, v. 34, n. 2, p. 225-229, 1970.
- TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.32, n.1, p.61-68, 2010.
- TEIXEIRA, I. R.; CAETANO M. S.; ALUÍZIO B.; GILSON F. S. Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes sistemas de preparo de solo. *Bragantia*, v. 62, p. 119-126, 2003.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos de mesa de tensão e da câmara de Richards. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Condutividade hidráulica. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; CARVALHO, J. L. N. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed. *BioEnergy Research*, v.12, p.764-777, 2019.
- TIECHER, T. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. 1ed. Porto Alegre: **UFRGS**, v.1, p. 53-54, 2016.
- TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. *Soil and Tillage Research*, v. 124, p. 57-67, 2012.
- TOLEDO, M. P. S.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; CAVALCANTI, R. Q.; ORTIZ, P. F. S.; CHERUBIN, M. R. Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils. *Soil and Tillage Research*, v.212, p.1-10, 2021.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.2, p.573-581, 1998.
- TORN, Margaret S. et al. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, v. 389, n. 6647, p. 170-173, 1997.

- UNICA. Ranking da produção de cana, açúcar e etanol das unidades da Região CentroSul: safra 2013/2014. Ribeirão Preto: ÚNICA, 2015. 30p.
- VALANI, G. P.; MARTINI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; CAMPOS BERNARDI, A. C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105357, 2022.
- VAN ANTWERPEN, R.; VAN HEERDEN, P. D. R.; KEEPING, M. G.; TITSHALL, L. W.; JUMMAN, A.; TWEDDLE, P. B.; VAN ANTWERPEN, T.; RAMOUTHAR, P. V.; CAMPBELL, P. L. A review of field management practices impacting root health in sugarcane. *Advances in Agronomy*, v.173, p.79-162, 2022.
- Van Den BOSSCHE, A.; DE BOLLE, S.; DE NEVE, S. & HOFMAN, G. Effect of tillage intensity on N mineralization of different crop residues in a temperate climate. **Soil Tillage Res.**, n.103, p. 316-324, 2008.
- VANCE, E.D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19: p.703- 707, 1987.
- VASCONCELOS, R. F. B. D.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S. D.; COSTA, Y. D. J. D.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 309-316, 2010.
- VASCONCELOS, R.F.B.; SOUZA, E.R.; CANTALICE, J.R.B.; SILVA, L.S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.4, p.381-386. 2014.
- VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. *Acta Oecologica*, v. 100, p. 103446, 2019.
- VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- VIDAL, A. et al. Visualizing the transfer of organic matter from decaying plant residues to soil mineral surfaces controlled by microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, v.160, p.108347, 2021.
- VILLA, J. F. D.; FRANÇA JUNIOR, P. Estabilidade dos agregados e a relação com a argila na bacia hidrográfica do ribeirão água Iguaçu. **Revista GeoPantanal**, v. 12, n. 23, p. 259-274, 2017.
- VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; SILVA, R. B.; TORRES, J. L. R.; LIMA, M. E. Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, Brisbane, v.11, n.2, p.169-176, 2017.
- VIZIOLI, B.; POLIZELI, K. M. V. C.; TORMENA, C. A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, v.209, p.1-10, 2021.
- WANG, W. J.; BALDOCK, J. A.; DALAL, R. C.; MOODY, P. W. Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v.36, n. 12, p. 2045-2058, 2004.
- WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; BAGIO, B.; KAUFMANN, D. S. Long-term effect of soil use and management on organic carbon and aggregate stability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170393, 2018.
- YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. D. Sugarcane straw decomposition and carbon balance as a function of initial biomass and vinasse addition to soil surface. **Bragantia**, v. 76, p. 135-144, 2017.
- YANG, P.; DONG, W.; HEINEN, M.; QIN, W.; OENEMA, O. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. *Land*, Basel, v. 11, n. 5, p. 1-18, 2022.

- YOULTON, C.; WENDLAND, E.; ANACHE, J. A. A.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; DABNEY, S. Changes in erosion and runoff due to replacement of pasture land with sugarcane crops. *Sustainability*, v. 8, n. 7, p. 685, 2016.
- ZENG, Q. et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). *CATENA*, v. 167, p. 276–283, 2018.
- ZHANG, X.; GUO, J.; VOGT, R. D.; MULDER, J.; WANG, Y.; QIAN, C.; WANG, J.; ZHANG, X. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands. *Geoderma*, v. 366, p. 114234, 2020.
- ZHANG, Z.; KAYE, J. P.; BRADLEY, B. A.; AMSILI, J. P.; SUSEELA, V. Os tipos funcionais de culturas de cobertura alteram diferencialmente o conteúdo e a composição do carbono orgânico do solo em frações particuladas e associadas a minerais. ***Biologia da Mudança Global***, v. 28, n. 19, p. 5831 - 5848, 2022.
- ZHOU, H.; CHEN, C.; WANG, D.; ARTHUR, E.; ZHANG, Z.; GUO, Z.; PENG, X.; MOONEY, S. J. Effect of long-term organic amendments on the full-range soil water retention characteristics of a Vertisol. ***Soil and Tillage Research***, v. 202, p. 104663, 2020.