

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTOS DO PREPARO OCASIONAL APÓS 26 ANOS EM
PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES ROTAÇÕES DE
CULTURAS SOBRE A PRODUTIVIDADE DA SOJA E
ALGUNS ATRIBUTOS DO SOLO**

Olavo Betiol
Engenheiro Agrônomo

**UNIVERSIDADE ESTAD
UAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTOS DO PREPARO OCASIONAL APÓS 26 ANOS EM
PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES ROTAÇÕES DE
CULTURAS SOBRE A PRODUTIVIDADE DA SOJA E
ALGUNS ATRIBUTOS DO SOLO**

Olavo Betiol

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Dr. Denizart Bolonhezi

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2025

B563i Betiol, Olavo

Impactos do preparo ocasional após 26 anos em Plantio direto com diferentes rotações de Culturas sobre a produtividade da soja e Alguns atributos do solo / Olavo Betiol. -- Jaboticabal, 2025

68 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Denizart Bolonbezi

1. Agronomia. 2. Glycine max. 3. Plantio direto. 4. Carbono. 5. Saúde do solo. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: IMPACTOS DO PREPARO OCASIONAL APÓS 26 ANOS EM PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES ROTAÇÕES DE CULTURAS SOBRE A PRODUTIVIDADE DA SOJA E ALGUNS ATRIBUTOS DO SOLO

AUTOR: OLAVO BETIOL

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

COORIENTADOR: DENIZART BOLONHEZI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
Data: 15/04/2025 16:32:51-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ALESSANDRO CHIODEROLI
Data: 15/04/2025 09:52:13-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. CARLOS ALESSANDRO CHIODEROLI (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) - Iturama/MG

Documento assinado digitalmente
gov.br AFONSO LOPES
Data: 15/04/2025 16:24:27-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. AFONSO LOPES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br JORGE WILSON CORTEZ
Data: 15/04/2025 10:26:04-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JORGE WILSON CORTEZ (Participação Virtual)
Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) / Dourados/MS



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
LEANDRO BORGES LEMOS
Data: 15/04/2025 15:27:29-0300
Verifique em <https://validar.idi.gov.br>

Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 15 de abril de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

OLAVO BETIOL – nascido em Ribeirão Preto, São Paulo, no dia 21 de agosto de 1996. Ingressou no curso de Agronomia no Centro Universitário Moura Lacerda (CUMML) de Ribeirão Preto, São Paulo, em novembro de 2013. Durante a graduação, foi bolsista de Iniciação Científica do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento à Pesquisa) entre 2017 e 2018. Nesse período, atuou junto ao Centro Avançado de Pesquisa de Cana (IAC), em pesquisas com manejo, conservação do solo, rotação de culturas para cana-de-açúcar, sistemas de cultivo e uso de conjuntos mecanizados para preparo de solo. Recebeu título de Engenheiro Agrônomo em setembro de 2018. Prosseguiu no IAC como bolsista de aperfeiçoamento técnico da Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola (FUNDAG), auxiliando em projetos de pesquisa sobre: melhoramento genético de amendoim, transplântio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em manejos conservacionistas de solo, validação tecnológica de cultivares de soja em reforma de canaviais, estudo do sistema radicular e produtividade de soja sobre plantio direto e calagem na reforma de canavial. Em agosto de 2019, iniciou curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do solo) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal, participando como colaborador em projetos coordenados pelo Dr. Denizart Bolonhezi (IAC), com bolsa da FUNDAG. Recebeu o título de mestre em julho de 2021. Em agosto de 2021, ingressou no curso de doutorado na mesma instituição e programa, vinculado aos projetos coordenados pelo Dr. Denizart Bolonhezi (IAC), com bolsa da FUNDAG. No segundo semestre de 2024, realizou intercâmbio na Universidade da Georgia (USA) no laboratório de Fisiologia de Culturas, coordenado pela Dra. Cristiane Pilon. Atualmente, trabalha como gerente da estação de pesquisa da Rural Agro Consultoria Agrônômica no estado do Mato Grosso. Em março de 2025, submeteu-se à defesa da tese para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio e compreensão em todos os momentos desta jornada. Aos meus amigos e colegas de pesquisa, que compartilharam desafios e conquistas. E, especialmente, aos meus orientadores e professores, pela inspiração, paciência e orientação ao longo desse caminho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, força e ensinamentos para seguir esse árduo caminho. Nossa Senhora de Aparecida, São Pedro, rogai por nós.

À minha esposa Geovanna Rafaela Pasuch Hauenstein Betiol, pelo incentivo e paciência.

Aos meus pais, Álvaro Betiol e Vera Lúcia Alves Betiol, que sempre me apoiaram e me deram todas as condições, apostaram comigo nesse sonho e me deram disposição para seguir. Não tenho palavras para descrever vocês.

Ao Professor Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani pela orientação, amizade, confiança transmitida, por acreditar no potencial e nas ideias de seus alunos e sempre ter palavras de conforto e otimismo para animar os momentos difíceis. Que nunca lhe falte paciência e discernimento para seguir firme com o propósito de lecionar e orientar.

Ao Dr. Denizart Bolonhezi, Pesquisador Científico, pela co-orientação, amizade, companheirismo, ensinamentos, exemplos de vida, grande defensor da prática de plantio direto, sobretudo no sistema de produção da cana-de-açúcar, por acreditar em meu potencial, pelas informações transmitidas e por todo suporte necessário para realização deste trabalho.

Aos integrantes da banca Professores Doutores Leandro Borges Lemos, Afonso Lopes, Carlos Alessandro Chioderoli e Jorge Cortez, que prontamente aceitaram o convite e não mediram esforços para colaborar com a melhoria deste trabalho.

À Dra. Cristiane Pilon, por me receber como bolsista no Departamento de Culturas e Solos nos EUA, Geórgia.

À Fundação AGRISUS pelo financiamento da pesquisa por intermédio do projeto PA 3385/22 (Impactos do Preparo Ocasional após 26 anos em Plantio Direto sobre a Soja e alguns Atributos Químicos, Físicos e Microbiológicos do Solo) coordenado pelo Dr. Denizart Bolonhezi e por diversos outros projetos apoiados nessa temática.

Ao Centro Avançado de Pesquisa em Cana, Instituto Agrônomo, pela área concedida e amparo com a estrutura e maquinário.

Fazenda Lago Azul/FLA Produções Agrícolas, por fornecer o implemento para realização do preparo do solo, em especial ao agrônomo Rodrigo Valochi, pelo empenho e dedicação.

À Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), aos professores que compõem o quadro do programa e propiciaram o aprimoramento dos meus conhecimentos.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao meu irmão Venâncio Betiol, pela paciência e toda a ajuda necessária.

Aos amigos e funcionários do setor de Fitotecnia do Centro de Cana/IAC, em especial aos agrônomos Élcio Leal e Fabio Fiori Ruiz e estagiários graduandos em agronomia Pedro Luz, Lucas Massarolo, Talyta Silva Ornelas que em nenhum momento mediram esforços para colaborar em todas as etapas de realização deste experimento.

Aos amigos do da Unesp de Jaboticabal, Luan Oliveira, Marcelo Júnior, por todos os trabalhos e aprendizados compartilhados. Muito obrigado!

Aos membros da família Palmieri, sr. Antônio João e seu filho William, que deram o amparo com maquinário necessário para semeadura e colheita da soja.

A todos que, direta ou indiretamente, participaram e contribuíram para a realização da pesquisa, fica aqui registrada minha eterna gratidão.

SUMÁRIO

RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	X
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 IMPACTOS DO PREPARO ESTRATÉGICO NA QUALIDADE DO SOLO	3
2.2 PLANTAS DE COBERTURA	4
2.3 BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1 ÁREA EXPERIMENTAL	9
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	10
3.3 OPERAÇÕES DE PREPARO DE SOLO E SEMEADURA.....	12
3.4 AVALIAÇÕES NOS CULTIVARES DE SOJA	17
3.5 SEMEADURA DAS PLANTAS DE COBERTURA E AVALIAÇÕES	20
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1 PRODUTIVIDADE DA SOJA E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS	26
4.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO.....	36
4.4 PLANTAS DE COBERTURA	41
4.5 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO	45
4.6 BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
6. CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS	62

IMPACTOS DO PREPARO OCASIONAL APÓS 26 ANOS EM PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES ROTAÇÕES DE CULTURAS SOBRE A PRODUTIVIDADE DA SOJA E ALGUNS ATRIBUTOS DO SOLO

RESUMO – O preparo ocasional do solo tem sido proposto como alternativa para reduzir a compactação e redistribuir nutrientes em áreas com longo histórico de plantio direto. Este estudo avaliou os impactos do preparo ocasional, após 26 anos em semeadura direta, sobre atributos químicos, físicos e microbiológicos do solo e na produtividade de cultivares de soja em um Latossolo Vermelho eutrófico em condição de sequeiro e de alta fertilidade. O experimento foi conduzido em um experimento de longa duração com diferentes rotações de culturas. Na safra 2022/23, foram feitos três tipos de preparo: subsolador, arado, e combinação de ambos, além de uma área mantida em plantio direto. Na safra 2023/24, foram introduzidas três opções de plantas de cobertura e uma área em pousio, segundo delineamento de parcelas subdivididas. Avaliaram-se o estoque de carbono e nitrogênio, atividade enzimática, resistência mecânica do solo à penetração e produtividade de cultivares de soja. O preparo ocasional proporcionou melhorias pontuais na fertilidade em subsuperfície e reduziu temporariamente a resistência do solo à penetração, mas reduziu o conteúdo de matéria orgânica, o estoque de carbono em 4,4% e a atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, reduzindo o índice de qualidade do solo em 11,3%, 25,5%, e 12,1% respectivamente. A produtividade da soja foi reduzida nos tratamentos com preparo em 13,5%, especialmente em condições de estresse hídrico. O plantio direto em consórcio com aveia e milheto, proporcionou incremento de 20,4% em produtividade aos cultivares de soja. Conclui-se que os efeitos negativos do preparo ocasional foram maiores que os benefícios pontuais observados.

Palavras-chave:

Experimento de longa duração, preparo estratégico, plantas de cobertura, *Glycine max*, carbono do solo, bioindicadores.

IMPACTS OF OCCASIONAL TILLAGE AFTER 26 YEARS OF NO-TILLAGE AND DIFFERENT CROP ROTATIONS ON SOYBEAN YIELD AND SOME SOIL ATTRIBUTES

ABSTRACT - Occasional soil tillage has been proposed as an alternative to reduce compaction and redistribute nutrients in areas with a long history of no-till farming. This study evaluated the impacts of occasional tillage, after 26 years under no-till, on chemical, physical, and microbiological soil attributes and on the yield of soybean cultivars in a dystrophic Red Latosol under rainfed conditions and high fertility. The experiment was conducted within a long-term trial involving different crop rotations. In the 2022/23 growing season, three types of tillage were applied: subsoiler, plow, and a combination of both, along with a no-till control. In the 2023/24 season, three cover crop options and a fallow area were introduced, in a split-plot design. Carbon and nitrogen stocks, enzyme activity, soil penetration resistance, and soybean yield were evaluated. Occasional tillage provided localized improvements in subsoil fertility and temporarily reduced soil penetration resistance, but also decreased organic matter content, carbon stock by 4.4%, and the activity of the enzymes β -glucosidase and arylsulfatase, reducing the soil quality index by 11.3%, 25.5%, and 12.1%, respectively. Soybean yield was reduced by 13.5% in the tilled treatments, especially under water stress conditions. No-till combined with oat and millet cover crops increased soybean yield by 20.4%. It is concluded that the negative effects of occasional tillage outweighed the localized benefits observed.

Keywords: Long-term trial, strategic tillage, cover crops, *Glycine max*, soil organic carbon, bioindicators.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.** AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO (A), MOAGEM DAS AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DO CARBONO TOTAL (B), TRINCHEIRA PARA AVALIAÇÃO INDEFORMADA DO SOLO (C) E TRINCHEIRA ABERTA NA MATA PARA OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA (D). RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. 12
- FIGURA 2.** AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO A PENETRAÇÃO COM PENETRÔMETRO DIGITAL DURANTE O SICLO DA SOJA 19/12/23 (A), PENETRÔMETRO DIGITAL (B), PENETRÔMETRO DE IMPACTO STOLF, AVALIAÇÃO 20/09/2022 (C) E AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO GRAVIMÉTRICO DE ÁGUA NO SOLO. RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. 13
- FIGURA 3.** EQUIPAMENTO UTILIZADO NO PREPARO SUBSOLADO VISTA FRONTAL (A) E SEUS COMPONENTES: DISCO ONDULADO DE CORTE (A1), RODA DE CONTROLE DE PROFUNDIDADE (A2), VISTA TRASEIRA (B), HASTE SUBSOLADORA (A1), ROLO DESTORROADOR (A2), TRATOR UTILIZADO PARA TRACIONAR SUBSOLADOR (C), VISTA AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO (D), SEM NENHUM PREPARO (D1) E APÓS PREPARO COM SUBSOLADOR (D). RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL..... 15
- FIGURA 4.** VISTA AÉREA DA ÁREA DE PESQUISA APÓS A OPERAÇÃO DE PREPARO COM ARADO E GRADE (A) PREPARO COM ARADO E GRADE SOBRE ÁREA SUBSOLADA (A2), PREPARO COM GRADE E ARADO SOBRE ÁREA SEM PREPARO (A1), TRATOR UTILIZADO PARA TRACIONAR ARADO (B), ARADO DE AIVECAS REVERSÍVEL (C) E GRADE LEVE (D). RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. 16
- FIGURA 5.** SEMEADURA DA SOJA, E DETALHES DA DISTRIBUIÇÃO DOS CULTIVARES NA SEMEADORA: MONSOY 6410 (A1), NIDERA 6700 (A2) E MONSOY 5947 (A3), VISTA LATERAL DA SEMEADORA HASTE ESCARIFICADORA COM DISTRIBUIÇÃO DO FERTILIZANTE (B1) E DISCO DE CORTE DE PALHA (B2), VISTA AÉREA APÓS A SEMEADURA (C) E VISTA AÉREA DA DISTRIBUIÇÃO DOS CULTIVARES NO ESTÁDIO FINAL DE DESENVOLVIMENTO. RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. 17
- FIGURA 6.** TRILHA DAS AMOSTRAS DE SOJA, TRILHADORA DE PARCELAS (A) E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS(B). RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL..... 19
- FIGURA 7.** SEMEADURA DAS PLANTAS DE COBERTURA, VISTA AÉREA APÓS A SEMEADURA (A), ADAPTAÇÕES FEITAS PARA SEMEADURA DE SEMENTES PEQUENAS (B), SEMEADURA DO TREMOÇO COM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO CONVENCIONAL (C) E SISTEMA DE

DISTRIBUIÇÃO DE SEMENTES PEQUENAS ACOPLADO NA BARRA PORTA FERRAMENTAS (D). RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL.	21
FIGURA 8. VISTA AÉREA DAS PLANTAS DE COBERTURA AOS 87 DAS (A), AVALIAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DE CADA ESPÉCIE NA BIOMASSA TOTAL (B), COLHEITA DO TREMOÇO COM COLHEDORA DE GRÃOS AOS 140 DAS (C), E MANEJO DA FITOMASSA DAS PLANTAS DE COBERTURA FOI AOS 135 DAS (D). RIBEIRÃO PRETO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL.	22
FIGURA 9. VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA E DAS TEMPERATURAS MÁXIMA E MÍNIMA DO AR NAS SAFRAS 2022/23 (A) E 2023/24 (B), COM MÉDIAS CALCULADAS A CADA DEZ DIAS EM RIBEIRÃO PRETO/SP.	26
FIGURA 10. CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS ALTURA DE PLANTAS NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES (A); E NÚMERO DE INTERNÓDIOS NAS HASTES PRODUTIVAS NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES (B), PRIMEIRA SAFRA. NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4 CROTALÁRIA; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.....	27
FIGURA 11. CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS ALTURA DE PLANTAS NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES (A); E NÚMERO DE INTERNÓDIOS NAS HASTES PRODUTIVAS NAS ROTAÇÕES, PREPAROS E CULTIVARES (B), SEGUNDA SAFRA. NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.	28
FIGURA 12. CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES (A) E BIOMASSA SECA DA PARTE AÉREA NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES (B), PRIMEIRA SAFRA NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4 CROTALÁRIA; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.....	28
FIGURA 13. CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES (A) E BIOMASSA SECA DA PARTE AÉREA NAS ROTAÇÕES, PREPAROS E CULTIVARES (B), SEGUNDA SAFRA NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S:	

SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO. 29

FIGURA 14. MATÉRIA SECA DO SISTEMA RADICULAR DOS CULTIVARES DE SOJA NOS HISTÓRICOS, PREPAROS E CULTIVARES PELO MÉTODO “SHOVELOMIC” NA PRIMEIRA SAFRA, NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4 CROTALÁRIA; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.30

FIGURA 15. POPULAÇÃO FINAL DE PLANTAS DOS CULTIVARES DE SOJA EM FUNÇÃO DOS HISTÓRICOS, PREPAROS DE SOLO E CULTIVARES. PRIMEIRA SAFRA (A); E SEGUNDA SAFRA (B). NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4 CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.....31

FIGURA 16. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO SOLO EM DIFERENTES PREPAROS (B). MÉDIAS SEGUIDAS POR LETRAS DIFERENTES INDICAM DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS PELO TESTE DE TUKEY ($P < 0,05$). SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.32

FIGURA 17. PRODUTIVIDADE DOS CULTIVARES DE SOJA EM FUNÇÃO DOS HISTÓRICOS, PREPAROS DE SOLO E CULTIVARES. PRIMEIRA SAFRA (A); E SEGUNDA SAFRA (B). NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4 CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.33

FIGURA 18. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM FUNÇÃO DOS PREPAROS DE SOLO E CULTIVARES DE SOJA NA PRIMEIRA SAFRA. LETRAS MAIÚSCULAS INDICAM A COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS CULTIVARES DENTRO DE CADA PREPARO, ENQUANTO LETRAS MINÚSCULAS INDICAM A COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS PREPAROS DENTRO DE CADA CULTIVAR. DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS FORAM DETERMINADAS PELO TESTE DE TUKEY ($P < 0,05$).

SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.35

FIGURA 19. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM FUNÇÃO DOS HISTÓRICOS DE ROTAÇÃO DE CULTURAS E CULTIVARES DE SOJA AVALIADOS NA PRIMEIRA SAFRA. LETRAS MAIÚSCULAS INDICAM A COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS CULTIVARES DENTRO DE CADA HISTÓRICO, ENQUANTO LETRAS MINÚSCULAS INDICAM A COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS HISTÓRICOS DENTRO DE CADA CULTIVAR. DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS DETERMINADAS PELO TESTE DE TUKEY ($P < 0,05$). SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4 CROTALÁRIA; M6410, N6700, M5947 E BRS7380: CULTIVARES DE SOJA.....36

FIGURA 20. RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO NAS SEGUINTE DATAS: 23 DE SETEMBRO DE 2022 (ANTES DAS OPERAÇÕES DE PREPARO), 9 DE FEVEREIRO DE 2023 (80 DAS DA SOJA DA PRIMEIRA SAFRA), 4 DE ABRIL DE 2023 (APÓS A COLHEITA DA SOJA), 20 DE JULHO DE 2023 (DURANTE O CICLO DAS PLANTAS DE COBERTURA, AOS 92 DAS), E 19 DE DEZEMBRO DE 2023 (DURANTE A SEGUNDA SAFRA DE SOJA, AOS 26 DAS). COMPARAÇÃO DE MÉDIAS EM CADA CAMADA DE SOLO (PROFUNDIDADE). NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO E S+A: SUBSOLADO E ARADO.....38

FIGURA 21. CONTEÚDO GRAVIMÉTRICO DE ÁGUA NO SOLO NAS DATAS AVALIADAS. COMPARAÇÃO DE MÉDIAS EM CADA CAMADA DE SOLO (PROFUNDIDADE). NS: NÃO SIGNIFICATIVO NO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE. SP: SEM PREPARO; A: ARADO; S: SUBSOLADO E S+A: SUBSOLADO E ARADO.....40

FIGURA 22. ACÚMULO DE BIOMASSA SECA NA PARTE AÉREA DAS PLANTAS DE COBERTURA AO DECORRER DO CICLO (A) AS MÉDIAS COMPARAM A BIOMASSA EM CADA DATA AVALIADA; E ACÚMULO DE MATÉRIA SECA EM FUNÇÃO DOS PREPAROS DE SOLO AOS 92 DAS (B). NS: NÃO SIGNIFICATIVO PELO TESTE DE TUKEY. SP: SEM PREPARO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.....41

FIGURA 23. QUANTIDADE DE MACRO NUTRIENTES (A); E MICRO (B), EXTRAÍDOS PELAS OPÇÕES DE PLANTAS DE COBERTURA AOS 92 DAS PELA ANÁLISE FOLIAR, * SIGNIFICATIVO TESTE DE TUKEY ($P < 0,05$). R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.....42

FIGURA 24. POPULAÇÃO DE NEMATÓIDES DE VIDA LIVRE E FITOPATOGÊNICOS DURANTE O CICLO DA SOJA EM DIFERENTES TRATAMENTOS DE HISTÓRICO DE ROTAÇÃO DE CULTURAS (A) E PLANTAS DE COBERTURA (C) E PREPAROS DO SOLO (B, D). AMOSTRAGEM REALIZADA AOS 63 DAS NA PRIMEIRA SAFRA (A, B) E AOS 60 DAS NA SEGUNDA SAFRA (C, D). NS: DIFERENÇA NÃO SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY ($P < 0,05$). SP: SEM PREPARO; S: SUBSOLADO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4: CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.44

FIGURA 25. COLONIZAÇÃO POR FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES, EM FUNÇÃO DOS PREPAROS E HISTÓRICO DE CULTIVO, AVALIADOS NAS SAFRAS 2022/23 (A) E 2023/24 (B) NS: DIFERENÇA NÃO SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY ($P < 0,05$). SP: SEM PREPARO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4: CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.....54

FIGURA 26. ATIVIDADE DA ENZIMA DE SOLO, FOSFATASE ÁCIDA DURANTE O CICLO DA SOJA NA PRIMEIRA SAFRA NOS PREPAROS DO SOLO E HISTÓRICO DE ROTAÇÃO (A); E NA SEGUNDA SAFRA APÓS AS PLANTAS DE COBERTURA (B), OS VALORES DA MATA DE REFERÊNCIA. AS MÉDIAS COMPARAM OS PREPAROS E OS HISTÓRICOS SEPARADAMENTE. VALORES DA MATA SÃO DE REFERÊNCIA NÃO ESTÃO INCLUSOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA, NS: NÃO SIGNIFICATIVO PELO TESTE DE TUKEY. SP: SEM PREPARO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4: CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.....55

FIGURA 27. ATIVIDADE BETA GLICOSIDASE DURANTE O CICLO DA SOJA NA PRIMEIRA SAFRA NOS PREPAROS DO SOLO E HISTÓRICO DE ROTAÇÃO (A); E NA SEGUNDA SAFRA APÓS AS PLANTAS DE COBERTURA (B), OS VALORES DA MATA DE REFERÊNCIA. AS MÉDIAS COMPARAM OS PREPAROS E OS HISTÓRICOS SEPARADAMENTE. VALORES DA MATA SÃO DE REFERÊNCIA NÃO ESTÃO INCLUSOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA, NS: NÃO SIGNIFICATIVO PELO TESTE DE TUKEY. SP: SEM PREPARO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4: CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.56

FIGURA 28. ATIVIDADE ARILSULFATASE DURANTE O CICLO DA SOJA NA PRIMEIRA SAFRA NOS PREPAROS DO SOLO E HISTÓRICO DE ROTAÇÃO (A); E NA SEGUNDA SAFRA APÓS AS

PLANTAS DE COBERTURA (B), OS VALORES DA MATA DE REFERÊNCIA. AS MÉDIAS COMPARAM OS PREPAROS E OS HISTÓRICOS SEPARADAMENTE. VALORES DA MATA SÃO DE REFERÊNCIA NÃO ESTÃO INCLUSOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA, NS: NÃO SIGNIFICATIVO PELO TESTE DE TUKEY. SP: SEM PREPARO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; T1: MILHO; T2: SOJA; T3 GIRASSOL; T4: CROTALÁRIA; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO. 56

FIGURA 29. ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO NOS PREPAROS DE SOLO E PLANTAS DE COBERTURA DURANTE A SEGUNDA SAFRA DA SOJA. RIBEIRÃO PRETO, SP, 2024. AS MÉDIAS COMPARAM OS PREPAROS E AS ROTAÇÕES SEPARADAMENTE, NS: NÃO SIGNIFICATIVO PELO TESTE DE TUKEY. SP: SEM PREPARO; S+A: SUBSOLADO E ARADO; R1: MILHETO + AVEIA; R2: VEGETAÇÃO ESPONTÂNEA POUSIO; R3: MIX DE PLANTAS DE COBERTURA E R4: TREMOÇO BRANCO.....57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO MACRONUTRIENTES, AMOSTRAGEM FEITA ANTES DOS PREPAROS DE SOLO, CONSIDERANDO O HISTÓRICO DE CULTURAS (T1- MILHO, T2 – SOJA, T3 – GIRASSOL E T4 – CROTALÁRIA JUNCEA NO VERÃO E MILHO SAFRINHA).	10
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO MICRONUTRIENTES, AMOSTRAGEM FEITA ANTES DOS PREPAROS DE SOLO, CONSIDERANDO O HISTÓRICO DO MANEJO CULTURAL DO SOLO (T1- MILHO, T2 – SOJA, T3 – GIRASSOL E T4 – CROTALÁRIA JUNCEA NO VERÃO E MILHO SAFRINHA).	11
TABELA 3. ESQUEMA EXPERIMENTAL DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS.....	25
TABELA 4. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NOS HISTÓRICOS DE CULTURAS ANTES DOS PREPAROS. RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRASIL, 2022.....	46
TABELA 5. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NO HISTÓRICO DE CULTURAS E NOS PREPAROS DE SOLO NA CULTURA DA SOJA. RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRASIL, 2023.	47
TABELA 6. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO ANTES DOS PREPAROS NAS CAMADAS DE 0,00 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60; 0,60 – 0,10 CM. RIBEIRÃO PRETO SÃO PAULO, BRASIL, 2022.	48
TABELA 7. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO APÓS OS PREPAROS NAS CAMADAS DE 0 – 5, 5 – 10, 10 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 100 CM. RIBEIRÃO PRETO SÃO PAULO, BRASIL, 2023.....	50
TABELA 8. DISTRIBUIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO NAS CAMADAS E ESTOQUE EM FUNÇÃO DO HISTÓRICO DE CULTURAS. RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRASIL, 2022.	52
TABELA 9. DISTRIBUIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO NAS CAMADAS E ESTOQUE EM FUNÇÃO DO HISTÓRICO DE CULTURAS E DOS PREPAROS DE SOLO NA CULTURA DA SOJA. RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRASIL, 2023.	53
TABELA 10. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PRODUTIVIDADE E ATIVIDADES ENZIMÁTICAS, SAFRA 22-23. RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRASIL, 2023.	58
TABELA 11. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PRODUTIVIDADE E ATIVIDADES ENZIMÁTICAS (SAFRA 2023/2024)	60

1. INTRODUÇÃO

O Brasil lidera o ranking mundial de produção de soja, com 46 milhões de hectares cultivados e uma produção de 147 milhões de toneladas. No estado de São Paulo, a área de cultivo de soja, que por décadas não ultrapassava 600 mil hectares, dobrou nos últimos 7 anos, alcançando mais de 1,3 milhão de hectares devido a diversas vantagens competitivas. Esse crescimento está fortemente ligado à expansão do sistema de plantio direto, que, juntamente com a fixação biológica de nitrogênio, proporcionou excelentes indicadores de sustentabilidade. A experiência brasileira com a semeadura direta contribuiu para disseminar práticas de Agricultura Conservacionista em mais de 250 milhões de hectares no mundo.

O sistema de semeadura direta oferece várias vantagens em relação ao preparo convencional do solo, como maior eficiência no controle da erosão, redução dos custos de produção, manutenção da umidade do solo e incremento na atividade microbiana. Entretanto, o sistema enfrenta desafios, incluindo o controle de mais de 41 espécies de plantas daninhas, dificuldades no manejo de pragas e doenças devido à ausência de rotação de culturas, estratificação de nutrientes na superfície (principalmente fósforo), baixa eficiência de corretivos aplicados superficialmente e aumento da compactação do solo, especialmente na ausência de tráfego controlado. Em razão desses desafios, a produtividade da soja em semeadura direta permanece abaixo do potencial genético das novas cultivares.

O preparo estratégico ou ocasional se apresenta como uma alternativa para mitigar esses problemas. Esse conceito refere-se a intervenções pontuais no solo, realizadas após um período de cultivo contínuo sem preparo (Dang et al., 2015), com o objetivo de melhorar o controle de plantas daninhas, incorporar corretivos, reduzir a compactação e uniformizar os indicadores de fertilidade no perfil do solo (Blanco-Canqui et al., 2020). No entanto, mesmo quando realizado de maneira esporádica, o preparo do solo pode gerar impactos que precisam ser mensurados. Nesse contexto, surgem as seguintes hipóteses: (i) O preparo ocasional do solo, após longo período em plantio direto, altera negativamente os estoques de carbono e a qualidade biológica do solo, reduzindo a produtividade da soja. (ii) Os efeitos do preparo sobre os atributos físicos do solo, como a resistência mecânica à penetração, são duradouros. (iii) Sistemas de plantio direto com plantas de cobertura favorecem o

desempenho da soja. (iv) A enzima beta-glicosidase é um bioindicador sensível capaz de refletir a produtividade da soja em diferentes sistemas de manejo do solo.

Considerando esse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar os impactos do preparo ocasional em um experimento de longa duração, conduzido sob plantio direto consolidado há 26 anos, com foco nos atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo, bem como nas características agronômicas da cultura da soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Impactos do preparo estratégico na qualidade do solo

A expansão do plantio direto no Brasil está diretamente relacionada ao aumento da área cultivada com soja, com estimativas indicando que quase 40 milhões de hectares utilizam esse sistema. Esse modelo contribui para o aumento da matéria orgânica e dos nutrientes no solo (Bieluczyk et al., 2020), promove condições favoráveis à atividade microbiana (Bertola et al., 2021), controla a erosão hídrica e eólica, conserva água e reduz custos de produção (Grandy et al., 2006; Obour et al., 2017; Lewis et al., 2018). Além disso, o plantio direto melhora as propriedades físicas do solo, aumenta o sequestro de carbono e eleva a produtividade das culturas (Blanco-Canqui et al., 2020).

No entanto, desafios associados ao uso contínuo desse sistema ao longo do tempo começaram a surgir, como a compactação do solo e a estratificação de nutrientes (Siqueira-Neto et al., 2009; Martínez et al., 2016), que podem impactar negativamente a qualidade biológica do solo e a produtividade agrícola (Fidalski et al., 2015; Peixoto et al., 2019). A redução da macroporosidade e a resistência mecânica do solo aumentam, restringindo o crescimento radicular e a absorção eficiente de água e nutrientes. Para mitigar esses problemas, estratégias de manejo têm sido estudadas, com destaque para o preparo ocasional e o uso de plantas de cobertura.

O preparo ocasional, também chamado de preparo estratégico, tem sido sugerido como uma solução para aliviar problemas estruturais do solo sem comprometer os benefícios do plantio direto. Essa prática pode proporcionar melhorias na estrutura física e química do solo e na produtividade das culturas (Blanco-Canqui et al., 2020). No entanto, estudos indicam que os efeitos desse manejo são transitórios (Fidalski et al., 2015; Pierce et al., 1994) e, além disso, sua aplicação deve ser criteriosa, considerando fatores como tipo de solo, profundidade do preparo e frequência das operações.

O preparo ocasional também tem sido estudado como uma ferramenta de manejo complementar em áreas consolidadas sob plantio direto, especialmente quando associado ao controle de plantas daninhas resistentes e à melhoria de aspectos químicos do solo. Pesquisas recentes demonstram que sua aplicação pode promover mudanças significativas na dinâmica do banco de sementes de plantas

daninhas. Gianelli et al., (2023), verificou que o preparo ocasional alterou a composição e a distribuição vertical das sementes, apontando para um potencial de uso no manejo integrado de plantas daninhas. Do ponto de vista físico, os impactos na distribuição de agregados e nas frações de carbono e nitrogênio do solo foram considerados limitados em solos de regiões semiáridas, sugerindo que os efeitos do preparo dependem fortemente das condições edafoclimáticas (Mills et al., 2023). Já sob o aspecto ambiental, foi demonstrado que o preparo ocasional pode contribuir para a redução de perdas de fósforo dissolvido, tanto em superfície quanto em subsuperfície, o que representa uma estratégia importante para mitigar a eutrofização em bacias hidrográficas (Lopez et al., 2024).

Pesquisas indicam que a mobilização ocasional do solo pode melhorar a infiltração de água e a aeração, contribuindo para o desenvolvimento do sistema radicular. Garcia et al. (2019) avaliaram os impactos de uma única intervenção de preparo em um sistema de plantio direto consolidado e observaram aumentos significativos na produtividade das culturas, associados à maior porosidade do solo e à maior eficiência na absorção de nutrientes. Outros estudos, como o de Johnson e Lee (2020), destacam que o preparo ocasional pode ser uma ferramenta auxiliar no manejo de plantas daninhas resistentes, reduzindo a dependência de herbicidas sintéticos e promovendo um melhor controle.

A mobilização do solo, mesmo quando realizada ocasionalmente, pode influenciar diretamente a distribuição da matéria orgânica, redistribuindo nutrientes e alterando a microbiota do solo. Martinez e Kumar (2021) analisaram os impactos da perturbação temporária em sistemas de plantio direto e concluíram que a reestruturação do solo favorece grupos funcionais de microrganismos benéficos envolvidos na ciclagem de nutrientes. Entretanto, Blanco-Canqui e Lal (2020) ressaltam que a adoção contínua desse preparo sem um adequado planejamento pode comprometer os benefícios do plantio direto a longo prazo. Portanto, a decisão de utilizar o preparo ocasional deve considerar a capacidade de recuperação da estrutura do solo, a qualidade da palhada e a adoção de práticas conservacionistas complementares.

2.2 Plantas de Cobertura

Uma alternativa complementar ao preparo ocasional é o uso de plantas de cobertura, que desempenham um papel fundamental na melhoria da saúde do solo. Essas plantas promovem maior agregação e diversidade biológica, especialmente em sistemas de plantio direto. Pesquisas indicam que o sistema radicular das plantas de cobertura pode penetrar em camadas compactadas, adicionar carbono orgânico ao solo e aumentar sua resistência à compactação (Blanco-Canqui et al., 2011a, b). Além disso, as plantas de cobertura auxiliam na mitigação da compactação e na redução de doenças transmitidas pelo solo (Chaer; Mendes, 2022). Seu uso pode reduzir a necessidade do preparo ocasional, promovendo a regeneração natural da estrutura do solo.

Estudos recentes indicam que a rotação de culturas e a presença de plantas de cobertura com sistemas radiculares profundos, como gramíneas e leguminosas, auxiliam na regeneração da estrutura do solo após a mobilização, garantindo que os benefícios do preparo ocasional sejam prolongados (Blanco-Canqui e Lal, 2020). Dessa forma, a integração dessas práticas conservacionistas pode contribuir para um sistema agrícola mais resiliente. A adição de matéria orgânica derivada da decomposição da palhada aumenta a retenção de umidade, melhora a capacidade de troca de cátions (CTC) e fornece uma fonte contínua de nutrientes para o desenvolvimento das culturas subsequentes.

2.3 Bioindicadores da Qualidade do Solo

A avaliação dos impactos do preparo ocasional e das plantas de cobertura pode ser feita por meio de bioindicadores da qualidade do solo, como as enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase. Essas enzimas possibilitam análises precoces da estabilidade da matéria orgânica e do funcionamento biológico do solo, sendo especialmente relevantes em sistemas de manejo como o plantio direto (Mendes et al., 2024). A beta-glicosidase, em particular, tem sido amplamente utilizada como indicador da atividade microbiana e do ciclo do carbono, pois está diretamente associada à decomposição de material orgânico e à liberação de nutrientes essenciais. Mendes et al. (2021) demonstraram que há uma correlação positiva entre a atividade dessa enzima e a produtividade da soja, tornando-a um bioindicador confiável da saúde do solo.

Por outro lado, enzimas como a fosfatase ácida e a arilsulfatase apresentam menor relevância como indicadores de produtividade em algumas condições experimentais, possivelmente devido à sua sensibilidade a fatores como pH do solo e práticas de manejo agrícola. A tecnologia de bioanálises (BioAS), desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), reforça a importância da beta-glicosidase como um dos principais indicadores de saúde do solo. Em contraste, a fosfatase ácida foi removida do índice de qualidade do solo devido à sua instabilidade (EMBRAPA, 2020). A adoção de bioindicadores permite o monitoramento mais eficiente da degradação e recuperação do solo, auxiliando na tomada de decisões para intervenções mais precisas no manejo agrícola.

O preparo ocasional surge como uma estratégia viável para mitigar os desafios do plantio direto de longa duração, oferecendo melhorias na estrutura do solo, na disponibilidade de nutrientes e no controle de plantas daninhas. Entretanto, sua adoção deve ser planejada e integrada a práticas conservacionistas, como o uso de plantas de cobertura e rotação de culturas. A avaliação contínua da qualidade do solo por meio de bioindicadores é essencial para monitorar os efeitos do manejo a longo prazo. Pesquisas futuras devem explorar estratégias para minimizar possíveis efeitos negativos do preparo ocasional, garantindo sua eficácia em diferentes sistemas agrícolas. Além disso, é fundamental compreender as interações entre a frequência do preparo do solo, os diferentes tipos de preparo e as respostas bioquímicas do solo ao longo do tempo para otimizar a produtividade agrícola.

Os nematoides são organismos abundantes no solo e desempenham funções essenciais na dinâmica dos ecossistemas agrícolas. Eles podem ser classificados em diferentes grupos funcionais, destacando-se os nematoides fitopatogênicos, que atacam as raízes das plantas de interesse e reduzem sua produtividade, e os nematoides de vida livre, que atuam na decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e no controle biológico de organismos prejudiciais competindo com eles pelo mesmo ambiente (Ferraz & Monteiro, 1995; Asmus, s.d.).

Em solos manejados sob plantio direto, os nematoides de vida livre tendem a ser mais abundantes devido ao maior acúmulo de matéria orgânica e à estabilidade do ambiente (Asmus, s.d.). No entanto, práticas como o preparo ocasional podem afetar a comunidade de nematoides, alterando a composição dos grupos presentes no solo. Enquanto a mobilização do solo pode reduzir temporariamente a população

de nematoides fitopatogênicos, também pode causar um declínio na diversidade de nematoides benéficos ao afetar seu micro-habitat (Ferraz & Monteiro, 1995).

A rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura têm sido estratégias eficazes na regulação populacional de nematoides, promovendo um equilíbrio entre organismos benéficos e fitopatogênicos (Asmus, s.d.). Plantas como o milheto e a crotalária são amplamente utilizadas para reduzir a população de fitonematoides, pois liberam compostos bioativos no solo que inibem sua proliferação (Ferraz & Monteiro, 1995).

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a importância de monitorar as populações de nematoides sob diferentes manejos do solo. O aumento da proporção de nematoides de vida livre em determinados tratamentos pode indicar um ambiente mais equilibrado e funcional, enquanto o aumento de fitonematoides pode sinalizar a necessidade de ajustes no manejo, como a diversificação de culturas e o uso de plantas de cobertura específicas para controle biológico.

2.4 Resistência mecânica do solo à penetração

Por definição, a compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento da densidade em consequência da redução de seu volume e aeração, ou seja, o efeito da compactação em um solo é a mudança na sua estrutura (Hillel, 1980; Gupta et al., 1989; Glinski e Lipiec, 1990; Hillel, 1998).

A compactação é outro reflexo da agricultura intensiva praticada nos moldes convencionais. Pesquisas têm demonstrado que a compactação aumenta a densidade do solo, a resistência mecânica do solo, diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros, salientando que as reduções significativas ocorrem principalmente no volume dos macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados (Dias Junior, 2000). Estas modificações podem ter efeitos negativos no crescimento das raízes e da parte aérea das plantas, bem como sobre a produção das culturas. A compactação pode resultar de causas naturais, incluindo impacto das gotas das chuvas, encharcamento e tensão interna da água. Já a compactação artificial ocorre sobre forças descendentes aplicadas pelos rodados de tratores, colhedoras e implementos utilizados na agricultura moderna (Glinski e Lipiec, 1990).

Elevados níveis de compactação afetam o crescimento do sistema radicular das culturas, devido aos efeitos diretos e indiretos da resistência, ocasionados pela diminuição da taxa de difusão do oxigênio no solo (Asady e Smucker, 1989; Unger e Kaspar, 1994; Masle, 2002). A impedância que oferece ao desenvolvimento radicular, diminui a capacidade das raízes explorarem maior volume de solo, reduzindo assim a absorção de nutrientes, tanto para fósforo e potássio que são absorvidos por difusão, quanto para os nutrientes que são predominantemente absorvidos por fluxo de massa (Shierlaw e Alston, 1984; Lipiec e Stepniewski, 1995). Além disso, a compactação interfere na atividade da biota no solo, reduzindo a formação de bioporos, os quais são canais preferencias para as raízes e que favorecem a absorção de nutrientes (Bauke et al., 2017). Outro efeito prejudicial da compactação em sistemas agrícolas está relacionado com a redução da infiltração de água no solo, alteração nas propriedades físicas e consequente diminuição na produtividade das culturas entre 6 e 34% (Obour e Ugarte, 2021).

Existem diferentes indicadores, metodologias e equipamentos para quantificar os níveis de compactação em solo. A resistência mecânica do solo à penetração tem sido extensivamente utilizada como técnica para realizar diagnóstico da distribuição do nível de compactação em solos. A resistência mecânica que o solo oferece à penetração expressa pelo índice do cone (IC) está diretamente relacionado com as alterações nos atributos físicos do solo (Campbell e O'Sullivan, 1991) e é um dos fatores que mais afeta o crescimento radicular e a produtividade das culturas (Collares et al., 2006). Os penetrômetros podem ser estáticos (dinamométricos ou eletrônicos) que dependem da força do operador ou de componentes mais sofisticados para determinação, fato que dificulta uso em condições de solo seco, ou pode ser dinâmico (impacto), que embora seja mais simples e de baixo custo, possui uma leitura mais demorada (Sá e Santos Junior, 2007).

Embora seja uma técnica rápida em comparação à outras que dependem de laboratório, a resistência mecânica do solo à penetração recebe muitos questionamentos, tais como: o cone não representa na realidade a dificuldade encontrada pelas raízes (Camargo e Alleoni, 1997), necessita fazer correção do conteúdo de água ao longo do perfil (Vaz et al., 2013; Fernandes et al., 2020) e pode apresentar alta variabilidade espacial (Bonnin et al., 2010; Guedes Filho et al., 2010). De acordo com Masle (2002), o valor de resistência à penetração medido em campo

superestima entre 2 e 8 vezes, considerando a resistência efetivamente encontrada pelas raízes das plantas. Porém, quando utilizada de forma adequada, confere um bom diagnóstico das diferenças entre sistemas de manejo do solo (Khuwald et al., 2020), assim como permite com precisão indicar qual a camada no perfil do solo apresenta a maior resistência mecânica à penetração (Moraes et al., 2013), fato que ajuda muito na tomada de decisão.

O presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto do preparo estratégico do solo em um experimento de longa duração sobre a produtividade da soja, o estoque de carbono e nitrogênio bem como os indicadores biológicos de qualidade do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em uma pesquisa de longa duração sob plantio direto e rotação de culturas, iniciado na safra 1995/96, localizada nas dependências do Centro Avançado de Pesquisa em Cana do Instituto Agrônomo, no município de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil. As coordenadas aproximadas e altitude do local de estudo são, respectivamente, 21°12'10.49" S e 47°52'32.98" W e 614 metros acima do nível do mar. A precipitação média anual registrada há mais de 70 anos é de 1.454 mm O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico de textura argilosa.

Em uma gleba de 12 hectares, desde 2002 o experimento permaneceu em plantio direto com quatro tratamentos de rotação de culturas. Os tratamentos foram mantidos neste histórico com: Milho (T1), Soja (T2), Girassol (T3) e Crotalária juncea no verão e milho safrinha (T4). Após três anos nesse esquema, o milho era semeado em área total com três doses de nitrogênio em cobertura (0, 90 e 180 kg/ha). Esse procedimento foi repetido em quatro safras: 2005/06, 2009/10 , 2013/14 e 2018/19. Nas safras 2019/20 e 2021/22 a cultura da soja foi cultivada em área total. Na safra 2022/23 e 2023/24, os tratamentos de preparo ocasional e as plantas de cobertura foram instalados.

3.2 Caracterização da área

O trabalho foi conduzido em condição de sequeiro, em um experimento de longa duração com histórico consolidado de 26 anos em semeadura direta e diferentes rotações de culturas. A raridade e o valor científico de uma área com esse nível de consolidação conferem elevada robustez à avaliação dos impactos do preparo ocasional, gerando evidências difíceis de serem obtidas em sistemas mais recentes. Na safra 2022/23, foram feitos três tipos de preparo: com subsolador, arado, e combinação de ambos, além de uma área mantida em plantio direto. A área experimental abrangeu faixas variando entre 1,0 e 2,0 hectares, nas quais foram estabelecidos os tratamentos de preparo ocasional. No dia 13 de setembro de 2022, foram realizadas amostragens de solo para caracterização das parcelas experimentais, nas Tabela 1 e Tabela 2, é evidenciado que o solo possui características de alta fertilidade na camada de 0 – 10 cm para P_2O_5 e K_2O , com base nos parâmetros para cultura da soja (Cantarella et al., 2022). Utilizando um trado do tipo Holandês, foram coletadas 10 amostras simples por amostra composta nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-100 cm, totalizando 96 amostras compostas (Figura 1a).

Tabela 1 - Características químicas do solo macronutrientes, amostragem feita antes dos preparos de solo, considerando o histórico de culturas (T1- milho, T2 – soja, T3 – girassol e T4 – Crotalária juncea no verão e milho safrinha).

Tratamento	Profundidade	P	M.O	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	SB	T	V
	cm	mg/dm ³	g/dm ³	CaCl ²	— mmolc/dm ³ —				mg/dm ³	mmolc/dm ³		%
T1	0 - 5	98	29	5	6	25	11	57	12	41	98	43
T2	0 - 5	72	23	6	6	39	16	35	11	62	97	64
T3	0 - 5	77	23	5	6	35	14	36	12	55	91	61
T4	0 - 5	74	29	5	7	28	13	45	15	47	93	53
T1	5 - 10	74	26	5	5	20	9	69	11	33	101	33
T2	5 - 10	54	23	5	4	23	10	54	8	36	91	41
T3	5 - 10	77	20	5	3	19	9	57	9	31	87	35
T4	5 - 10	69	20	4	3	12	6	84	12	20	105	20
T1	10 – 20	49	19	5	3	16	6	58	10	25	83	31
T2	10 – 20	44	21	5	3	21	8	49	8	31	80	40
T3	10 – 20	42	22	5	3	18	8	54	11	28	82	35
T4	10 – 20	36	18	5	3	14	6	58	13	22	80	27
T1	20 – 40	23	14	5	3	18	6	43	10	26	69	38
T2	20 – 40	26	17	5	3	19	6	47	12	28	75	37

T3	20 – 40	26	17	5	3	18	6	44	13	27	71	38
T4	20 – 40	26	17	5	3	17	6	47	11	25	72	35
T1	40 – 60	13	12	5	3	18	6	33	12	26	59	44
T2	40 – 60	13	14	5	2	17	6	35	21	25	59	42
T3	40 – 60	14	14	6	2	15	6	32	17	23	56	42
T4	40 – 60	18	14	5	2	16	6	34	12	23	58	41
T1	60 – 100	9	11	5	2	14	6	29	25	21	50	43
T2	60 – 100	19	11	5	2	12	5	31	33	19	50	37
T3	60 – 100	8	11	5	1	12	5	28	23	18	47	39
T4	60 – 100	10	11	5	1	14	5	30	21	20	50	40

Tabela 2 - Características químicas do solo micronutrientes, amostragem feita antes dos preparos de solo, considerando o histórico do manejo cultural do solo (T1- milho, T2 – soja, T3 – girassol e T4 – Crotalaria juncea no verão e milho safrinha).

Histórico	Profundidade	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	cm	mg/dm ³				
T1	0 - 5	0,30	8	31	26	3,70
T2	0 - 5	0,26	7	24	21	2,60
T3	0 - 5	0,34	7	25	23	2,80
T4	0 - 5	0,23	7	30	26	3,00
T1	5 - 10	0,29	8	30	25	2,85
T2	5 - 10	0,23	8	28	22	1,65
T3	5 - 10	0,20	8	29	22	2,35
T4	5 - 10	0,34	8	31	23	1,45
T1	10 – 20	0,23	8	27	20	1,25
T2	10 – 20	0,22	7	26	18	0,55
T3	10 – 20	0,21	7	26	18	0,55
T4	10 – 20	0,31	7	27	19	0,60
T1	20 – 40	0,29	7	25	15	0,35
T2	20 – 40	0,26	6	25	14	0,25
T3	20 – 40	0,24	6	25	13	0,20
T4	20 – 40	0,20	6	25	11	0,20
T1	40 – 60	0,21	5	22	9	0,20
T2	40 – 60	0,29	4	22	8	0,20
T3	40 – 60	0,20	4	22	7	0,20
T4	40 – 60	0,20	4	22	8	0,20
T1	60 – 100	0,23	3	17	8	0,20
T2	60 – 100	0,85	3	17	5	0,20
T3	60 – 100	0,20	2	18	5	0,20
T4	60 – 100	0,14	3	19	6	0,20

As amostras foram encaminhadas ao laboratório da Coopercitrus, localizado no município de Bebedouro, Estado de São Paulo. Após as análises, as amostras foram

moídas finamente para determinação do conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio total por combustão seca em analisador elementar, conforme metodologia proposta por Nelson e Sommers (1996). A moagem foi realizada manualmente com o auxílio de pistilo e almofariz cerâmicos (Figura 1b).

Concomitantemente, em 14 de setembro de 2022, foram abertas 16 trincheiras manualmente com auxílio de ferramentas, nas dimensões de 100 cm de profundidade por 100 cm de comprimento. Nessas trincheiras, foram retirados 96 anéis volumétricos (5 cm de altura por 5 cm de diâmetro) nas mesmas camadas de solo em cada parcela, totalizando 96 amostras (Figura 1c). As amostras foram enviadas ao laboratório do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), no município de Campinas, Estado de São Paulo, para determinação de atributos físicos do solo, seguindo os procedimentos descritos por Embrapa (1997). Adicionalmente, amostras foram coletadas utilizando a mesma metodologia em uma área de mata nativa, localizada nas proximidades das coordenadas geográficas 21°10'52.7" S e 47°53'37.5" W, próxima à área experimental, foram realizadas quatro repetições para cada amostra (Figura 1d).

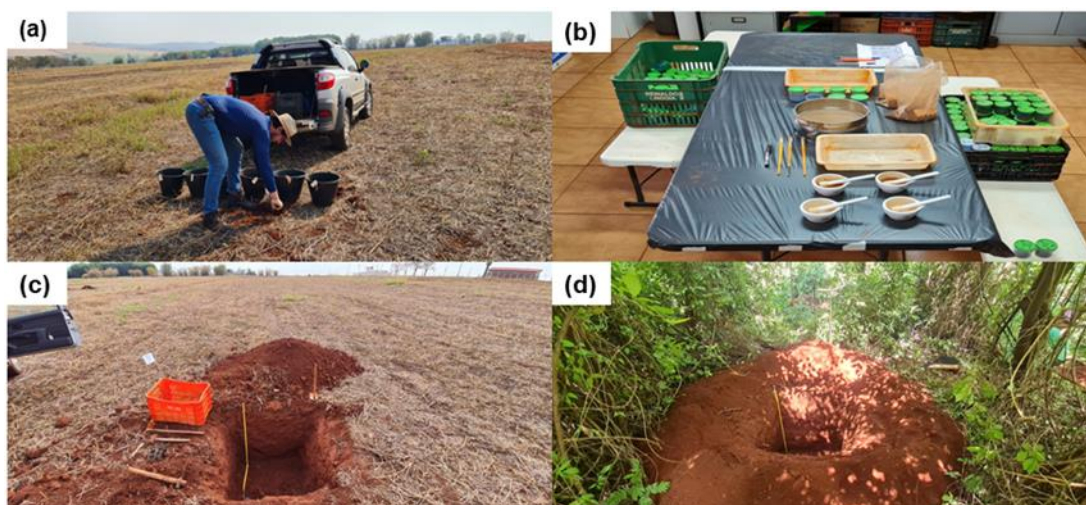


Figura 1. Avaliação dos atributos químicos do solo (a), moagem das amostras para determinação do carbono total (b), trincheira para avaliação indeformada do solo (c) e trincheira aberta na mata para obtenção das amostras de referência (d). Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

3.3 Operações de preparo de solo e semeadura

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi medida em todas as parcelas nas seguintes datas: 23 de setembro de 2022 (antes das operações de

preparo), 9 de fevereiro de 2023 (80 DAS da soja da primeira safra, Figura 2a), 4 de abril de 2023 (após a colheita da soja, Figura 2b), 20 de julho de 2023 (durante o ciclo das plantas de cobertura, aos 92 DAS, Figura 2c) e 19 de dezembro de 2023 (durante a segunda safra de soja, aos 26 DAS). As medições foram realizadas em intervalos de profundidade de 0,01 m, da superfície até 5 cm de profundidade, utilizando um penetrômetro digital (marca DLG, modelo PNT2000®). As leituras foram feitas a 25 cm do centro da linha de semeadura, em quatro pontos aleatórios dentro de cada parcela, evitando áreas onde os rodados do pulverizador passaram durante o ciclo da cultura.

Durante o ciclo das plantas de cobertura, a baixa umidade do solo e os altos níveis de compactação impediram o uso do penetrômetro digital. Nessas condições, foi utilizado o penetrômetro de impacto descrito por Stolf (1991). Esse equipamento funciona por meio de impactos de uma massa padrão sobre uma haste cônica, permitindo avaliar a resistência do solo em diferentes profundidades. O número de golpes necessário para penetrar o solo foi registrado, e os valores foram convertidos em resistência à penetração (RP) expressa em MPa, utilizando a equação de Stolf, ajustada para as condições locais. Os dados de RP foram transferidos para o computador para análise estatística. No mesmo dia de cada avaliação, amostras de solo foram coletadas em cinco profundidades (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm), seguindo a metodologia descrita por Camargo et al. (1986), para determinar o conteúdo gravimétrico de água no solo em gramas de água por gramas de solo (g/g) (Figura 2d).

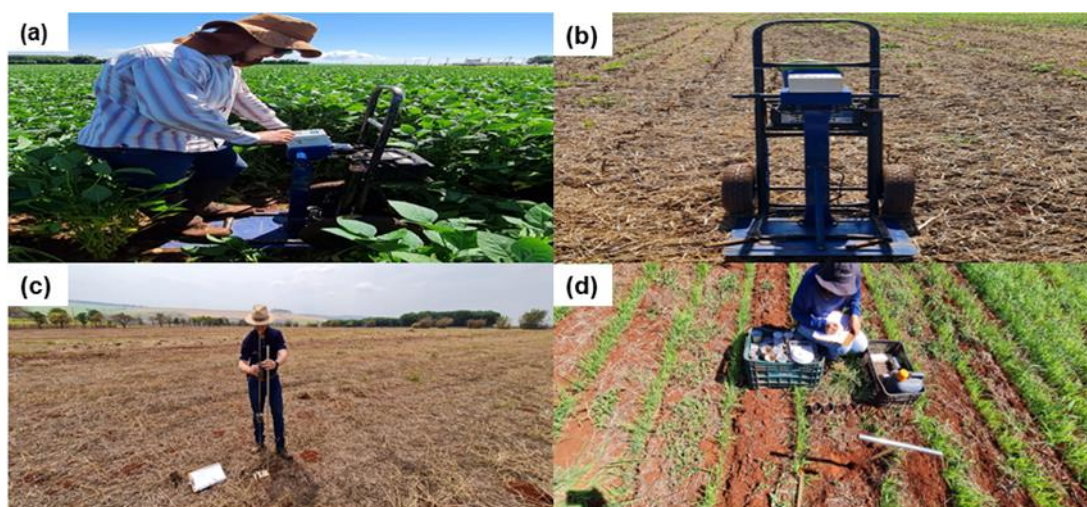


Figura 2. Avaliação da resistência mecânica do solo a penetração com penetrômetro digital durante o ciclo da soja 19/12/23 (a), penetrômetro digital (b), penetrômetro de

impacto Stolf, avaliação 20/09/2022 (c) e avaliação do conteúdo gravimétrico de água no solo. Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

Após a caracterização das parcelas, foi aplicada uma dose de 1,7 Mg/ha de calcário dolomítico em área total, com as seguintes características: 24,3% de cálcio (Ca) e 17,3% de magnésio (Mg), com Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de 70%.

Para as operações relacionadas ao preparo ocasional, cada parcela foi subdividida em quatro tratamentos que envolveram as seguintes operações de preparo de solo: sem preparo (SP) área mantida em semeadura direta, arado (A), subsolador (S) e subsolador e arado (S+A) sendo este último comparável ao preparo convencional. Dessa forma, a área experimental passou a ser organizada em um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, totalizando 64 parcelas.

O preparo com subsolador foi realizado em 27 de outubro de 2022, utilizando um subsolador com discos de corte de 22 polegadas (Figura 3a1) posicionados a frente das seis hastes do tipo reta inclinada (Figura 3b1) com ponteira estreita de 4 cm (modelo Terrus DXS®, GTS®), espaçadas a 60 cm, com profundidade de trabalho de 40 cm (Figura 3a e Figura 3b) e rolo destorroador (Figura 3b2). O implemento foi tracionado por um trator John Deere®, modelo 6145J 4x2 TDA, com 145 cavalos de potência, deslocando-se a uma velocidade de 4,3 km/h e equipado com tecnologia de direcionamento automático (GNSS) (Figura 3c). Durante o preparo, o teor gravimétrico de água no solo foi de 0,21, 0,23, 0,23, 0,24 e 0,24 g/g nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm, respectivamente. O preparo com subsolador foi realizado em posições alternadas entre as parcelas, com a operação atingindo o centro de cada faixa, cobrindo 50% da área, de modo a permitir o preparo subsolado e arado em parte da área onde o subsolador foi utilizado (Figura 3d).

Em 6 de novembro de 2022, foi aplicada uma mistura de herbicidas em área total, incluindo glifosato (Roundup®), oxima ciclohexanodiona (Cletodim®) e óleo

mineral (Dash®) nas doses de 3 e 1 litros por hectare (L/ha), com 0,5% de volume de calda por volume de produto (v/v), respectivamente.



Figura 3. Equipamento utilizado no preparo subsolado vista frontal (a) e seus componentes: disco ondulado de corte (a1), roda de controle de profundidade (a2), vista traseira (b), haste subsoladora (a1), rolo destorroador (a2), trator utilizado para tracionar subsolador (c), vista aérea da área de estudo (d), sem nenhum preparo (d1) e após preparo com subsolador (d). Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

Na sequência, o preparo S+A foi realizado no dia 14 de novembro de 2022, abrangendo parte da área previamente submetida à subsolagem (Figura 4a2) e outra área sem preparo anterior (Figura 4a1), de modo a combinar os efeitos dos implementos utilizados (Figura 4a). No momento dessa operação, o teor gravimétrico de água no solo foi de 0,19, 0,21, 0,21, 0,22 e 0,22 g/g nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm, respectivamente.

Para a operação, foi utilizado um trator New Holland®, modelo 8030 (Figura 4b), 4x2 TDA com 122 cavalos de potência, a uma velocidade de deslocamento de 4,5 km/h, tracionando um arado reversível de aiveca da marca Maschietto®, modelo ARH-2 (Figura 4c), com duas aivecas e profundidade de trabalho de 38 cm. Após essa operação, no dia 15 de novembro de 2022, foi realizada uma gradagem com o mesmo trator, utilizando uma grade niveladora do tipo offset da marca Tatu Marchesan®, com 36 discos de 22 polegadas (Figura 4d) e profundidade de trabalho de 20 cm, com o objetivo de nivelar a superfície do solo.

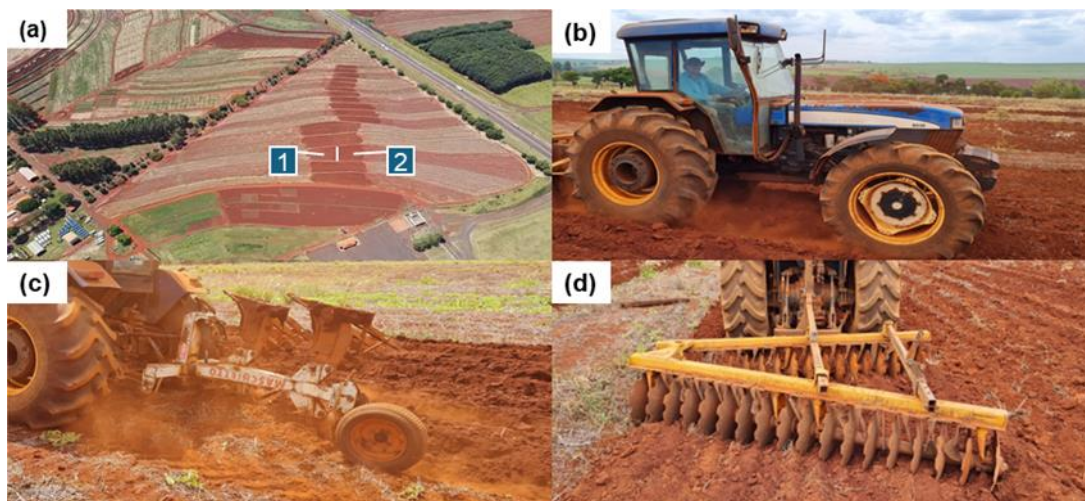


Figura 4. Vista aérea da área de pesquisa após a operação de preparo com arado e grade (a) preparo com arado e grade sobre área subsolada (a2), preparo com grade e arado sobre área sem preparo (a1), trator utilizado para tracionar arado (b), arado de aivecas reversível (c) e grade leve (d). Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

Para o preparo A, foi utilizado o mesmo conjunto trator-implemento mencionado anteriormente. A operação foi realizada de maneira simultânea ao preparo S+A, consistindo apenas na operação de aragem, seguida pela gradagem utilizando o mesmo conjunto descrito anteriormente. Durante o preparo, o teor gravimétrico de água no solo foi de 0,18, 0,28, 0,50, 0,25 e 0,25 g/g nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm, respectivamente. As parcelas que não receberam nenhuma intervenção mecânica foram classificadas como preparo SP.

A semeadura dos cultivares de soja foi realizada no dia 21 de novembro de 2022 (Figura 5c), utilizando-se uma semeadora adubadora de nove linhas espaçadas a 5 cm, modelo COP-CA, marca Tatu Marchesan® (Figura 5a). O sistema de distribuição de sementes foi gravitacional, com disco duplo desencontrado no sulco de semeadura, haste escarificadora para a distribuição de fertilizante e disco cortapalha de 24 polegadas (Figura 5b). As regulagens foram uniformes em todos os tratamentos quanto à densidade de sementes (17 sementes por metro), profundidade de semeadura e distribuição de fertilizante no sulco (15,5 kg/ha de N, 85 kg/ha de P_2O_5 e 27,5 kg/ha de K_2O).

Os cultivares de soja utilizados foram Monsoy 6410 IPRO, Nidera 6700 IPRO, Monsoy 5947 IPRO e Embrapa 7380 RR. Cada cultivar foi semeado longitudinalmente nas faixas, ocupando três linhas da semeadora (Figura 5a), permitindo que diferentes repetições de cada genótipo fossem estabelecidas em cada faixa. Na Figura 5d, é

possível observar os cultivares mais precoces com coloração mais amarelada. Antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com os produtos Masterfix L Soja e Masterfix L Gramíneas, da Stoller®, e já possuíam tratamento com CropStar® e APRON®



Figura 5. Semeadura da soja, e detalhes da distribuição dos cultivares na semeadora: Monsoy 6410 (a1), Nidera 6700 (a2) e Monsoy 5947 (a3), vista lateral da semeadora haste escarificadora com distribuição do fertilizante (b1) e disco de corte de palha (b2), vista aérea após a semeadura (c) e vista aérea da distribuição dos cultivares no estágio final de desenvolvimento. Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

3.4 Avaliações nos Cultivares de Soja

Durante o ciclo da cultura, foi realizado o controle de plantas daninhas com aplicação dos herbicidas glifosato e cletodim em 21 de dezembro de 2022. Em seguida, aplicou-se 60 kg/ha de N e K₂O a lanço. O levantamento do estande inicial de plantas foi realizado em 16 de janeiro de 2023, com contagem em cinco pontos de 1 metro em cada cultivar em cada parcela, para obtenção das médias em cada tratamento.

Aos 63 dias após a semeadura (DAS), em 23 de janeiro de 2023, foi realizada a amostragem para quantificação de nematoides. Essa amostragem considerou os preparos de solo, e não os cultivares de soja. Em cada parcela, foram retiradas cinco amostras aleatórias entre os cultivares, utilizando uma pequena enxada de jardim. O primeiro 10 cm de solo foi descartado, e a coleta foi feita na camada de 10 a 20 cm. O sistema radicular foi coletado na mesma camada e enviado para o Laboratório de Nematologia do Instituto Biológico, em Campinas, São Paulo, para quantificação de

nematoides, incluindo nematoides de vida livre (não fitopatogênicos). Esta amostragem foi realizada apenas nos preparos S+A, SP e S, totalizando 48 amostras.

Aos 70 DAS, foi realizada a amostragem do sistema radicular pela metodologia “shovelomics”, avaliando todos os cultivares de soja nos preparos S+A, S e SP, com quatro plantas por parcela, totalizando 192 amostras. O objetivo dessa amostragem foi avaliar o sistema radicular, seu crescimento. Em cada parcela, as plantas foram removidas cuidadosamente, visando não danificar o sistema radicular, uma pá foi introduzida no solo a uma profundidade de 25 cm, na mesma distância do caule da planta, levantando com cuidado o solo ao redor da planta selecionada e retirando a amostra com solo e sistema radicular. No local, foi realizada uma leve agitação para remover a maior parte do solo aderido às raízes. As coroas das raízes foram, lavadas com água em baixa pressão e submetidas a secagem, e em seguida foram pesadas para determinar matéria seca.

Na mesma ocasião, foram retiradas amostras da parte aérea das plantas de soja para determinação da massa seca. Em cada parcela, foi coletada uma amostra de 1 metro linear de cada cultivar. As amostras foram colocadas em estufa de circulação de ar forçado a 60 °C por 72 horas e, após secagem, foram pesadas para determinação da massa seca.

Aos 77 DAS (06 de fevereiro de 2023), foram retiradas amostras de solo na camada de 0-0,1 m, próximas à linha de semeadura, para análise laboratorial dos bioindicadores de qualidade do solo, incluindo infecção por fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) (conforme Phillips e Hayman, 1970) e carbono da biomassa microbiana (conforme Vance et al., 1987). Para isso, dois pontos simples foram amostrados em cada cultivar, misturando-se o solo junto com algumas raízes para formar uma amostra composta. Devido ao alto custo das análises, essa amostragem foi realizada apenas nos tratamentos SP e S+A, totalizando 32 amostras. A mesma amostragem foi feita em uma área de mata nativa próxima à área experimental, com quatro amostras compostas coletadas para análise.

O controle fitossanitário foi realizado com um pulverizador da marca Jacto®, modelo Columbia Cross, com capacidade de 2000 litros, tracionado por um trator New Holland®, modelo TL85E 4x2 TDA, com 85 cavalos de potência e tecnologia GNSS.

As aplicações foram realizadas conforme as necessidades e recomendações específicas.

A colheita da soja foi iniciada em 17 de março de 2023 para os cultivares mais precoces, e em 27 de março de 2023 os mais tardios. Os cultivares de soja estudados foram: Monsoy 6410 IPRO (M6410), Nidera 6700 IPRO (N6410), Monsoy 5947 IPRO (M5947) e Embrapa 7380 (BRS7380). Em cada parcela, foram arrancados dois pontos com duas linhas de 5 metros cada, totalizando uma amostra de 10 metros lineares. Após a contagem do número de plantas, as amostras foram arrancadas manualmente, operação realizada para cada cultivar, preparo e histórico, totalizando 640 amostras. As plantas foram amarradas em feixes e devidamente etiquetadas para serem trilhadas ainda no campo. Durante a coleta, foram realizadas medições da altura das plantas, inserção da primeira vagem, número de vagens nos reprodutivos e hastes reprodutivas em três plantas por parcela. Após essa amostragem, foi utilizada uma recolhedora John Deere, modelo S430, para colher o restante da área.

Após a coleta, as amostras foram trilhadas no campo utilizando uma trilhadora estacionária de parcelas da marca SB Máquinas Agrícolas®. A trilhadora possui um motor diesel monocilíndrico, arrefecido a ar, com capacidade de 0,456 m³ e potência máxima de 12,5 cv, sistema de trilha axial e peneira vibratória com sucção de ar para limpeza dos grãos trilhados (Figura 6a), visando a estimativa da produtividade. Os grãos foram pesados com uma balança da marca Toledo®, modelo Prix3 Plus, com capacidade para 15 kg e resolução de 0,005 kg. A determinação da umidade dos grãos foi realizada com um medidor portátil de umidade da marca Farmex®, com precisão de $\pm 0,5\%$. Além disso, foi determinado o peso de mil sementes (PMS). Após a contagem dos grãos, eles foram pesados utilizando uma balança SF-400, com resolução de 0,001 kg (Figura 6b).



Figura 6. Trilha das amostras de soja, trilhadora de parcelas (a) e equipamentos utilizados(b). Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

Após a colheita das cultivares de soja, realizada em 11 de abril de 2023, iniciaram-se as amostragens de solo para fins de avaliação da fertilidade, utilizando o mesmo procedimento e as mesmas profundidades de amostragem aplicadas antes da instalação dos tratamentos de preparo. A amostragem foi realizada nos preparos S+A, S e SP, totalizando 288 amostras, que foram enviadas ao Laboratório da Coopercitrus, em Bebedouro/SP. Após a obtenção dos resultados, as amostras foram moídas finamente, de forma manual, com almofariz, para posterior determinação do conteúdo de carbono total. Em seguida, foram retirados 288 anéis volumétricos nas mesmas camadas para a determinação de características físicas básicas do solo. Cabe destacar que, para todos os atributos do solo, as amostragens também foram realizadas em uma área de mata nativa.

3.5 Semeadura das plantas de cobertura e avaliações

Para a semeadura das plantas de cobertura, em 18 de abril de 2023, foram realizadas as aplicações em área total dos herbicidas Roundup®, Cletodim® e Dash®, nas doses de 3 L/ha, 1 L/ha e 0,5% v/v, respectivamente. No histórico de milho, soja/milho, girassol/sorgo e Crotalária juncea/milho, foram semeados, respectivamente: um mix de milheto (*Pennisetum glaucum*) a 25 kg/ha + aveia preta (*Avena strigosa*) a 50 kg/ha (R1); vegetação espontânea ou pousio (R2); um mix de sete espécies de plantas, incluindo aveia preta (*Avena strigosa*), aveia ucraniana (*Avena strigosa* L.), crambe (*Crambe abyssinica*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*), ervilhaca comum (*Vicia sativa*), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*), centeio (*Secale cereale*) a 50 kg/há (R3) e tremoço branco (*Lupinus albus*) com seis sementes por metro (R4). Dessa forma, manteve-se o contraste entre sistemas predominantes de leguminosas, gramíneas, sistemas diversificados e pousio (Figura 7a).

Para viabilizar a semeadura em linha do mix de plantas de cobertura e do milheto + aveia, foi realizada uma adaptação na semeadora modelo COP-CA da Tatu Marchesan® (Figura 7b), a mesma utilizada para a semeadura de soja na primeira fase do projeto. O tremoço branco foi semeado com o mesmo sistema de distribuição de sementes da soja (Figura 7c), utilizando um disco adequado para o calibre das sementes. Por meio de uma parceria com a empresa fabricante da semeadora, foi

instalada uma caixa para sementes pequenas (sistema de distribuição por fluxo contínuo), acoplada à barra "porta-ferramentas" da semeadora COP-CA (Figura 7d).



Figura 7. Semeadura das plantas de cobertura, vista aérea após a semeadura (a), adaptações feitas para semeadura de sementes pequenas (b), semeadura do tremoço com sistema de distribuição convencional (c) e sistema de distribuição de sementes pequenas acoplado na barra porta ferramentas (d). Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

A escolha das opções de plantas de cobertura foi feita considerando as condições climáticas do outono, com preferência por espécies tolerantes às temperaturas mais baixas e à limitada disponibilidade de água (Figura 8a). Foram realizadas avaliações periódicas do estande de plantas e da biomassa seca da parte aérea das espécies aos 28, 77 e 92 dias após a semeadura. Nos dois tratamentos que envolviam consórcios ou mix, foi contabilizada a participação de cada espécie na biomassa total ao longo do tempo. As amostragens consistiram no corte da biomassa da parte aérea em uma área de 0,5 m², com separação e contagem das espécies (Figura 8b). Em seguida, as amostras foram transferidas para uma estufa de circulação de ar forçado a 70 °C por 72 horas. O mesmo procedimento foi adotado para o tratamento mantido com vegetação espontânea. Durante o florescimento pleno das espécies, foi separada uma alíquota da biomassa seca para determinar a quantidade de nutrientes extraídos e exportados.

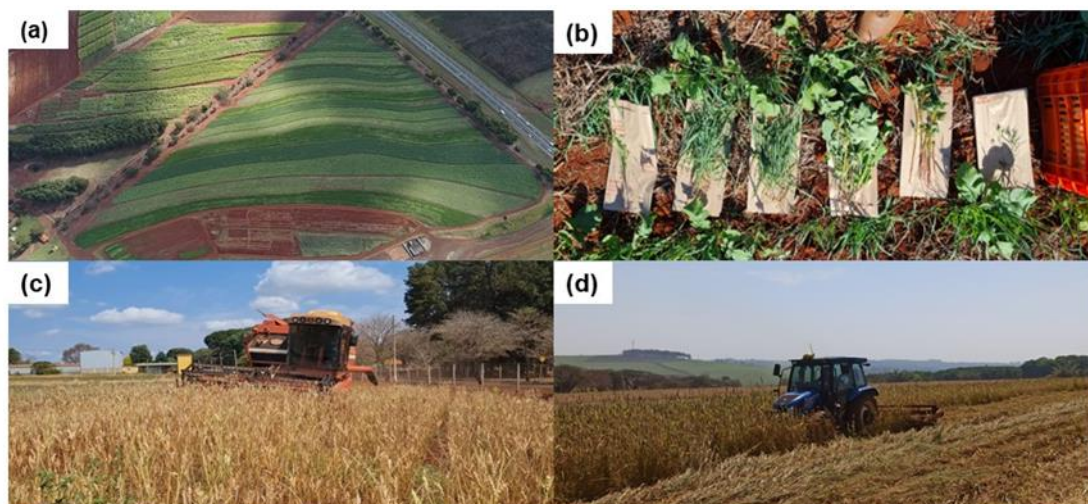


Figura 8. Vista aérea das plantas de cobertura aos 87 DAS (a), avaliação da participação de cada espécie na biomassa total (b), colheita do tremço com colhedora de grãos aos 140 DAS (c), e manejo da fitomassa das plantas de cobertura foi aos 135 DAS (d). Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil.

O manejo da fitomassa das plantas de cobertura foi realizado aos 135 DAS, utilizando rolo-faca nas parcelas dos tratamentos T1 e T3 (Figura 8d). O tremço branco completou seu ciclo e foi colhido com uma colhedora de grãos modelo 3660 da Massey Ferguson®, aos 140 DAS (Figura 8c), resultando em uma produção de 642,6 kg/ha de grãos. Para todas as variáveis avaliadas, foram realizadas análises de variância, conforme delineamento em parcelas subdivididas, e as médias dos tratamentos foram submetidas a testes de comparação.

Durante o ciclo das plantas de cobertura, em 02 de junho de 2023, foi realizada uma nova amostragem indeformada de solo com anéis volumétricos, seguindo a mesma metodologia da primeira amostragem feita em 14 de setembro de 2022. Essa amostragem foi realizada nas parcelas SP, S+A e S, com o objetivo de compreender os efeitos dos preparos nas características físicas do solo e interpretar os dados de conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio.

Após o manejo das plantas de cobertura, em 14 de setembro de 2023, foi aplicado calcário (1 Mg/ha) e gesso na mesma proporção, a lanço. Para controle das plantas daninhas presentes na área após o manejo das plantas de cobertura, assim como na área mantida em pousio (T2), foi realizada uma aplicação em área total, em 26 de outubro de 2023, dos herbicidas glifosato, oxima ciclohexanodiona e óleo

mineral, nas doses de 3 L/ha e 1 L/ha, com 0,5% de volume de calda por volume de produto (v/v), respectivamente.

Devido à maior infestação de plantas daninhas nas parcelas submetidas ao preparo com arado e subsolador mais arado, e com o intuito de avaliar o efeito da incorporação dos resíduos, foi realizada uma operação com grade aradora nas parcelas A e S+A, em 17 de novembro de 2023. Para essa operação, foi utilizado um trator New Holland®, modelo T7, 4x2 TDA com 260 cv de potência, operando a uma velocidade de deslocamento de 5,5 km/h, tracionando uma grade aradora do tipo offset da marca Tatu Marchesan®, com 20 discos de 28 polegadas e profundidade de trabalho de 0,3 m, para uniformizar a área e aumentar o contraste entre os tratamentos. Em seguida, foi realizada a semeadura da segunda safra de soja na mesma data da safra anterior (23 de novembro de 2023), utilizando a mesma metodologia, mantendo-se os mesmos cultivares de soja.

A leitura da temperatura da superfície do solo foi realizada em 20 de dezembro de 2023, abrangendo todos os tratamentos. As medições foram feitas com um termômetro infravermelho, posicionado a uma distância de 20 cm do solo, no intervalo entre 12h e 14h. Nas parcelas dos preparos SP e S, a palhada remanescente dos restos culturais foi removida para que as leituras fossem feitas diretamente na superfície do solo. Já nos preparos S+A e A, essa remoção não foi necessária, pois os restos culturais haviam sido incorporados durante a operação de gradagem. Em cada parcela, foram realizadas cinco leituras, totalizando 320 medições ao todo.

Durante o ciclo da cultura, aos 46 DAS, foi realizada uma aplicação de 60 kg/ha de N e K₂O a lanço em área total, em 22 de janeiro de 2024. Aos 60 DAS, foi feita a amostragem para nematoides e Bio AS, seguindo a metodologia utilizada na safra anterior. O controle de plantas daninhas foi realizado com a aplicação dos herbicidas Glifosato e Cletodim em 5 de fevereiro de 2024. Aos 97 DAS, foram coletadas amostras da parte aérea das plantas de soja para determinação da massa seca e, em cada parcela, foi coletada uma amostra de 1 metro linear de cada cultivar, que foi colocada em uma estufa de circulação de ar forçado a 60 °C por 72 horas. Após a secagem, as amostras foram pesadas para determinação da massa seca.

Aos 138 DAS, em 9 de abril de 2024, foi realizada a colheita dos cultivares de soja, seguindo a mesma metodologia empregada na safra anterior para determinar a

produtividade e as características agronômicas. O restante da área foi colhido com a recolhedora de grãos mencionada anteriormente.

3.6 Análises estatísticas

A análise estatística foi realizada pelo software AGROESTAT (Barbosa & Maldonado, 2009) utilizando ANOVA e o teste de Tukey foi empregado para determinar a separação entre as médias. Os dados de produtividade e atividades enzimáticas foram submetidos a teste de correlação. Para a resistência mecânica do solo à penetração foi considerada uma média dos valores obtidos pelos penetrômetros em camadas de 10 cm para comparação entre os tratamentos. A descrição completa dos tratamentos aplicados e do delineamento experimental utilizado para cada variável avaliada pode ser consultada na Tabela 3.

Tabela 3. Esquema experimental das avaliações realizadas

Parâmetro avaliado	Fatores considerados	Número de tratamentos considerados dentro de cada fator			Delineamento experimental	Observações
		TP	TS	TT		
Produtividade da soja e características agronômicas	Histórico de rotação (TP); preparos de solo (TS) e cultivares de soja (TT)	4	4	4	DBC, com parcelas sub- subdivididas	
Matéria seca do sistema radicular	Histórico de rotação (TP); preparos de solo (TS) e cultivares de soja (TT)	4	3	4	DBC, com parcelas sub- subdivididas	
Temperatura da superfície	Preparo de solo (TP)	4	-	-	DBC	
Resistência mecânica do solo à penetração e conteúdo gravimétrico de água no solo	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	Referente a amostragem feita 23/09/22
	Preparo de solo (TP)	4	-	-	DBC	Referente as amostragens subsequentes
Macronutrientes e micro ciclados pelas plantas de cobertura	Histórico de rotação (TP) e preparos de solo (TS)	4	3	-	DBC, com parcelas subdivididas	
Acúmulo de biomassa seca na parte aérea das plantas de cobertura	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
	Preparo de solo (TP)	3	-	-	DBC	
Quantidade de macro nutrientes e micro extraídos pelas plantas de cobertura	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
População de nematoides de vida livre e fitopatogênicos	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
	Preparo de solo (TP)	3	-	-	DBC	
	Plantas de cobertura (TP)	4	-	-	DBC	
Atributos físicos do solo antes dos preparos de solo	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
	Plantas de cobertura (TP)	4	-	-	DBC	
	Preparos de solo (TP)	3	-	-	DBC	
Características químicas do solo antes dos preparos	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
Características químicas do solo após os preparos	Preparos de solo (TP)	3	-	-	DBC	
Distribuição de carbono e nitrogênio nas camadas e estoque antes dos preparos	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
	Preparos de solo (TP)	3	-	-	DBC	
	Histórico de rotação (TP)	4	-	-	DBC	
	Preparos de solo (TP)	2	-	-	DBC	
Colonização por fungos micorrízicos arbusculares; fosfatase ácida; atividade beta glicosidase e arilsulfatase	Plantas de cobertura (TP)	4	-	-	DBC	
	Preparos de solo (TP)	2	-	-	DBC	
Índice de qualidade do solo	Plantas de cobertura (TP)	4	-	-	DBC	
Análise de correlação entre as variáveis de produtividade e atividades enzimáticas.	-	-	-	-	DBC	Correlação com produtividade fosfatase ácido carbono da biomassa FMAS beta-glicosidase e arilsulfatase

(TP) - tratamento principal; (TS) - tratamento secundário; (TT) - tratamento ternário; (DBC) - delineamento de blocos casualizados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produtividade da soja e características agronômicas

As condições climáticas durante as safras de 2022/23 e 2023/24 apresentaram diferenças significativas, impactando diretamente o desenvolvimento da cultura da soja. Dados obtidos de uma estação meteorológica do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), localizada nas proximidades da área de pesquisa, indicam que, na safra 2022/23, a precipitação acumulada foi de 1.304 mm (Figura 9a), enquanto na safra 2023/24 totalizou 675 mm (Figura 9b). Além disso, a segunda safra registrou temperaturas mais elevadas, especialmente durante períodos críticos do ciclo da soja.

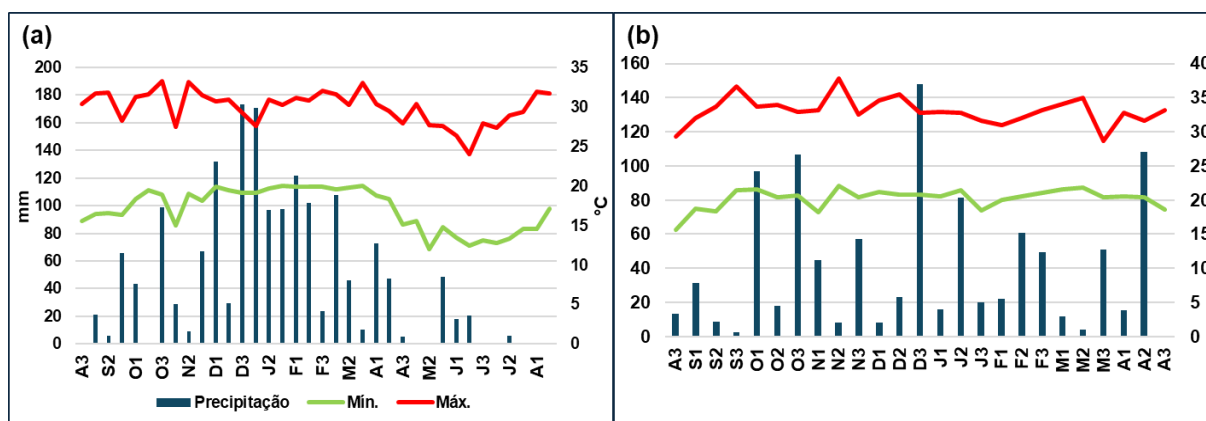


Figura 9. Variação da precipitação acumulada e das temperaturas máxima e mínima do ar nas safras 2022/23 (a) e 2023/24 (b), com médias calculadas a cada dez dias em Ribeirão Preto/SP.

A disponibilidade hídrica é um fator determinante para a produtividade da soja, déficits hídricos, combinados com temperaturas elevadas, podem comprometer processos fisiológicos essenciais, resultando em reduções significativas no rendimento. Estudos recentes destacam que a variabilidade climática afeta diretamente a produtividade da soja, sendo que condições adversas, como estiagens e ondas de calor que estão evidenciadas na segunda safra (Figura 9a), podem levar a perdas substanciais na produção (Baptista et al., 2020).

Para mitigar os efeitos negativos de condições climáticas adversas, práticas de manejo como a diversificação de culturas e a adoção de técnicas que melhoram a estrutura do solo são recomendadas. Essas estratégias aumentam a capacidade de

retenção de água no solo e promovem um desenvolvimento radicular mais profundo, auxiliando as plantas a suportarem períodos de estresse hídrico (Embrapa, 2021).

Portanto, as diferenças observadas nas condições climáticas entre as duas safras estudadas evidenciam a importância de práticas de manejo adequadas para garantir a sustentabilidade e a produtividade da cultura da soja em cenários de variabilidade climática.

A Figura 10 apresenta os dados das características agronômicas na primeira safra. Observa-se que o preparo S+A proporcionou aumento significativo na altura de plantas, número de internódios e número de vagens por planta, em comparação aos outros preparos. Esse desempenho pode ser atribuído à redução temporária da resistência do solo à penetração, que favoreceu o crescimento inicial da soja sob condições de umidade adequadas.

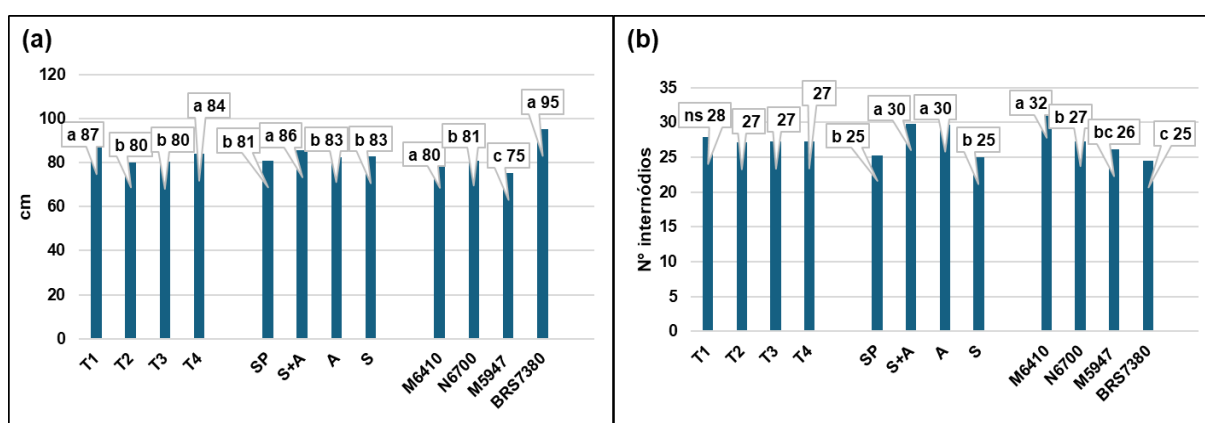


Figura 10. Características agronômicas altura de plantas nos históricos, preparos e cultivares (a); e número de internódios nas hastes produtivas nos históricos, preparos e cultivares (b), primeira safra. ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4 crotalária; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

Na segunda safra, os efeitos dos preparos foram menos expressivos (Figura 11 a). As elevadas temperaturas e a menor disponibilidade hídrica comprometeram o desenvolvimento inicial da soja, anulando os benefícios estruturais oriundos do

preparo ocasional. Para altura de plantas o efeito do histórico foi o mesmo observado na safra anterior.

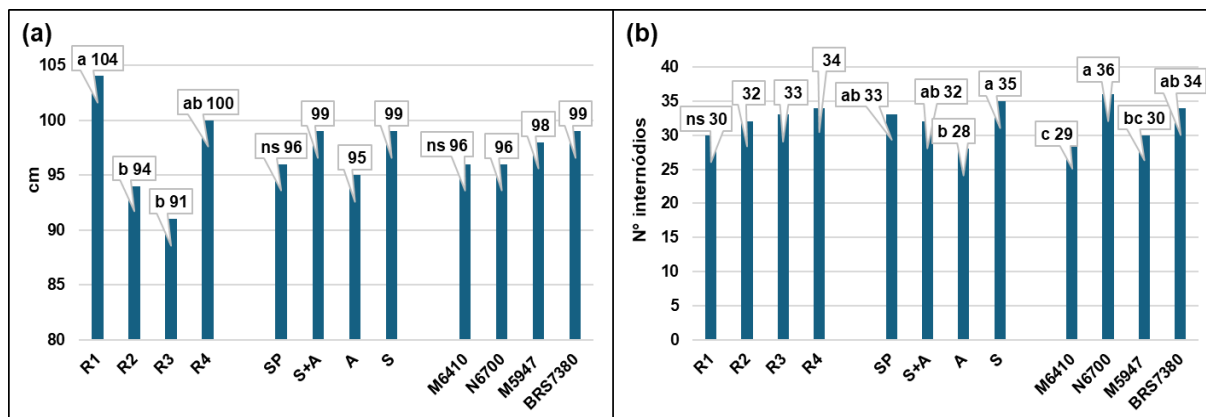


Figura 11. Características agrônômicas altura de plantas nos históricos, preparos e cultivares (a); e número de internódios nas hastes produtivas nas rotações, preparos e cultivares (b), segunda safra. ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

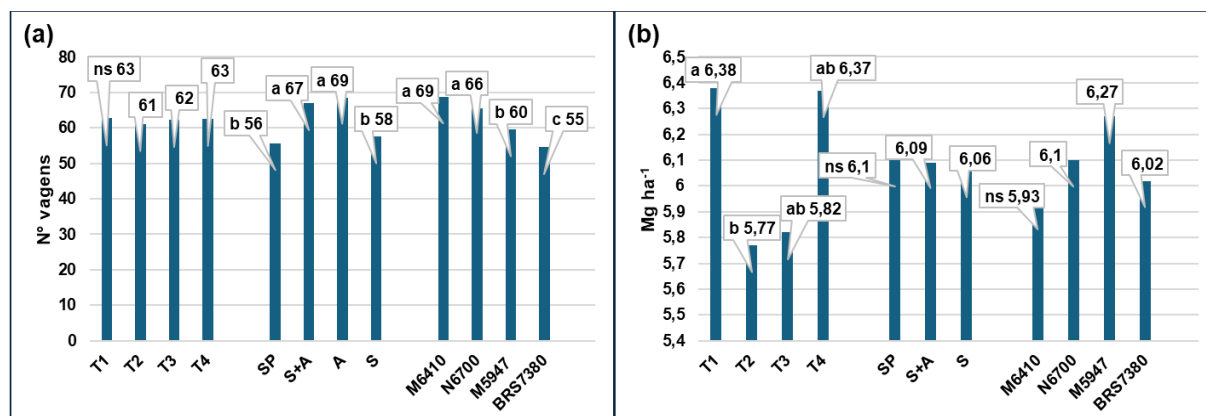


Figura 12. Características agrônômicas número de vagens por planta nos históricos, preparos e cultivares (a) e biomassa seca da parte aérea nos históricos, preparos e cultivares (b), primeira safra ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4 crotalária; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

Conforme ilustrado na Figura 12 a, e Figura 13 a, o cultivar N6700 IPRO demonstrou maior estabilidade produtiva nas duas safras, sobressaindo-se em número de vagens. A interação genótipo × ambiente é evidenciada, mostrando que materiais com maior potencial genético têm melhor capacidade de adaptação, especialmente quando associados a históricos de culturas. De modo geral, os

resultados indicam que os benefícios do preparo ocasional são pontuais e temporários, sendo superados pelos efeitos positivos proporcionados pela manutenção do sistema plantio direto, especialmente quando associado a estratégias de rotação e consórcio com plantas de cobertura, mostrando que o efeito do histórico da área mantida sem preparo por 26 anos, é maior do que os efeitos do preparo ocasional, principalmente em anos mais secos.

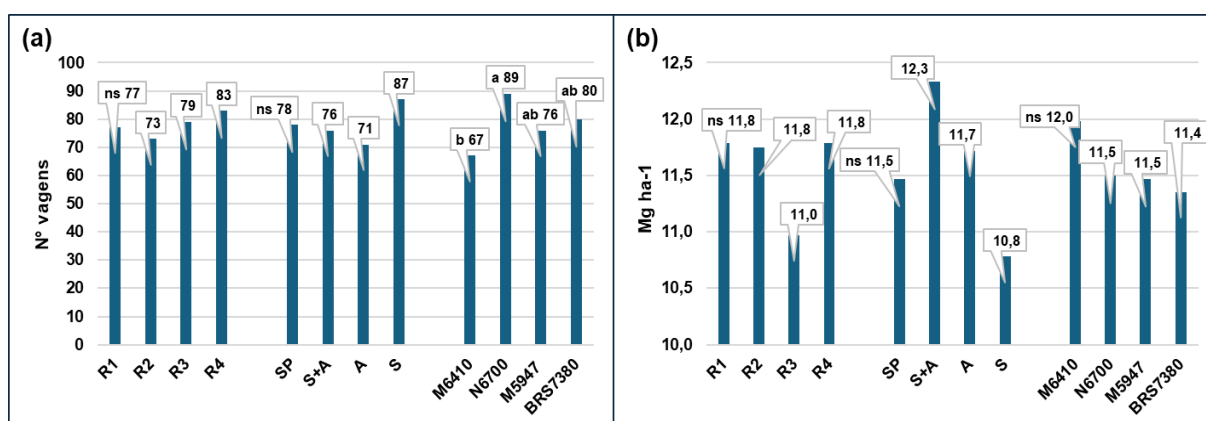


Figura 13. Características agrônômicas número de vagens por planta nos históricos, preparos e cultivares (a) e biomassa seca da parte aérea nas rotações, preparos e cultivares (b), segunda safra ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

Por outro lado, a maior biomassa seca das raízes, avaliada pelo método “shovelomics”, foi observada no tratamento SP (Figura 14). Esse aumento na biomassa radicular pode estar associado aos altos níveis de compactação do solo.

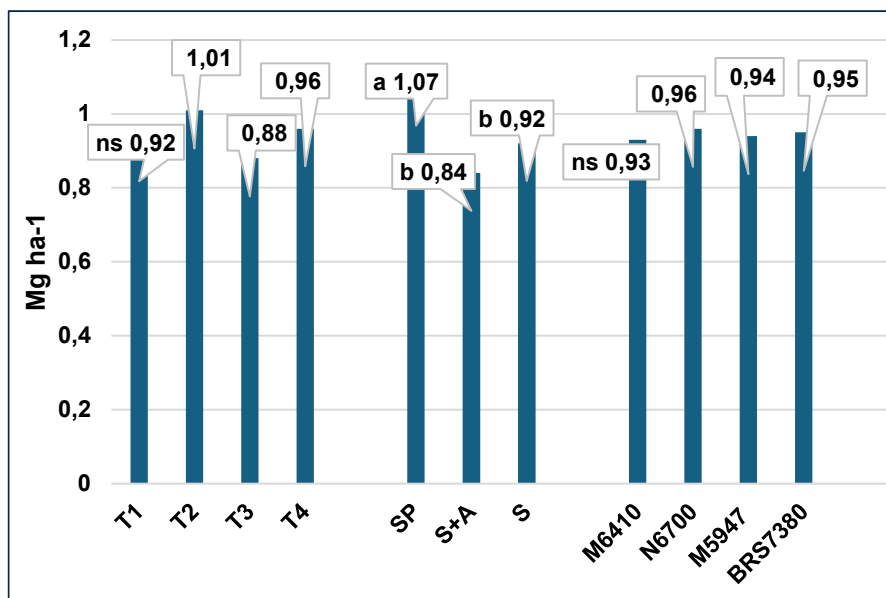


Figura 14. Matéria seca do sistema radicular dos cultivares de soja nos históricos, preparos e cultivares pelo método “shovelomic” na primeira safra, ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4 crotalária; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

Atualmente, o conceito de solo saudável e o uso de indicadores de qualidade do solo têm ganhado destaque, reforçando que a manutenção de bons níveis de fertilidade química, isoladamente, não é suficiente para garantir altos tetos produtivos. Esses resultados ressaltam a importância de estratégias de manejo integradas que considerem atributos químicos, físicos e biológicos do solo para assegurar a produtividade das culturas.

A população de plantas apresentou variações significativas entre os diferentes tratamentos e cultivares avaliados, como ilustrado na Figura 15a. Em relação aos tratamentos de histórico de culturas, o tratamento T1 apresentou a maior população de plantas (230 mil plantasha⁻¹), enquanto os tratamentos T2, T3 e T4 apresentaram populações estatisticamente semelhantes, variando entre 214 e 215 mil plantas.ha⁻¹. Esses resultados sugerem que o histórico de cultivo consolidado influencia uniformemente o estabelecimento das plantas em diferentes condições, com pequenas variações entre as rotações avaliadas. Na segunda safra o tratamento R1 mostrou promover melhores condições para o estabelecimento do estande de plantas (Figura 15b), e os efeitos dos preparos de solo são semelhantes comparados com a

safrã anterior onde o menor revolvimento do solo proporcionou condições favoráveis para emergência adas plantas.

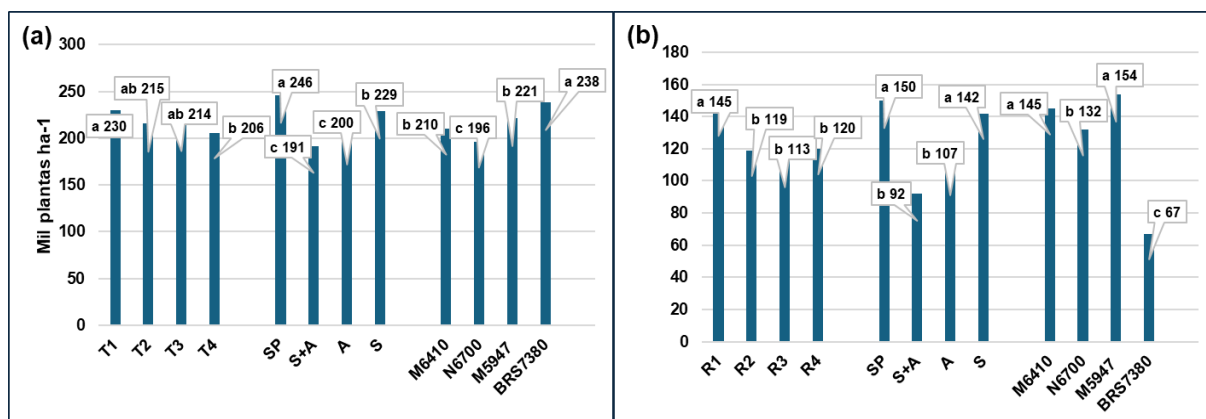


Figura 15. População final de plantas dos cultivares de soja em função dos históricos, preparos de solo e cultivares. primeira safra (a); e segunda safra (b). ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4 crotalária; R1: milheto + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

O preparo do solo SP resultou na maior população de plantas (246 e 150 mil plantas ha⁻¹) na primeira e segunda safra respectivamente, destacando o potencial do sistema de plantio direto contínuo em proporcionar condições favoráveis para o estabelecimento das plantas. Em contraste, o preparo S+A apresentou a menor população (191 e 92 mil plantasha⁻¹), possivelmente devido a distúrbios no solo causados pela intervenção mecânica mais intensiva, que podem ter prejudicado umidade e temperatura do solo em curto prazo. Na primeira safra, os preparos S e A apresentaram populações intermediárias, com valores de 229 e 200 mil plantasha⁻¹, respectivamente.

As diferenças entre os cultivares também foram evidentes, o cultivar BRS7380 apresentou a maior população (238 mil plantasha⁻¹) na primeira safra, porém no segundo ano por conta de má qualidade fisiológica das sementes e clima desfavorável, este cultivar teve a menor população entre os materiais avaliados. As altas temperaturas e menores volumes de chuva na segunda safra diminuíram a população das plantas de soja em 42% comparado ao ano anterior, as altas temperaturas do solo como evidenciado na Figura 16, influenciaram fortemente na emergência e estabelecimento das plantas.

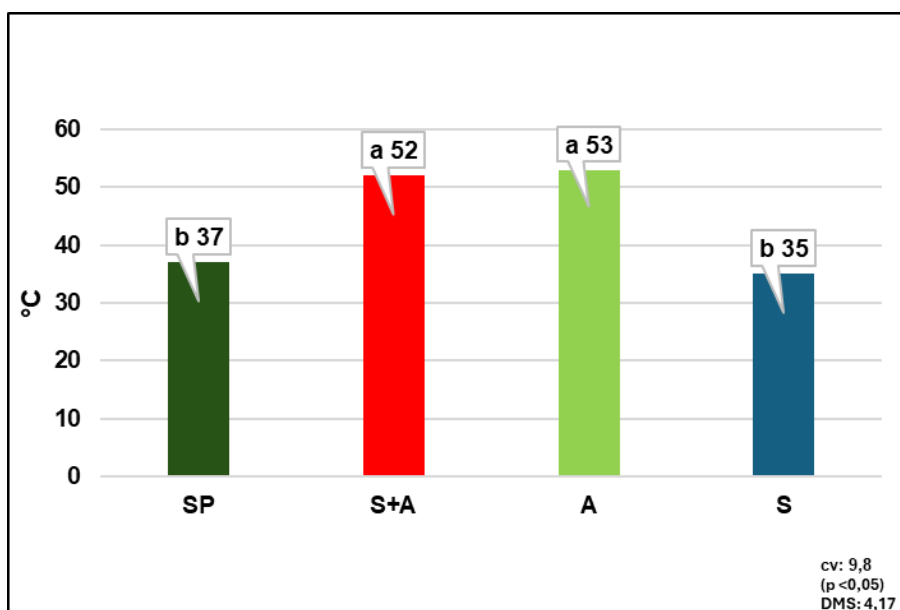


Figura 16. Temperatura da superfície do solo em diferentes preparos (b). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: trevo branco.

Esses resultados destacam que a interação entre os diferentes preparos do solo e as características dos cultivares desempenha um papel importante na determinação da população final de plantas. O tratamento SP, associado a condições mais conservacionistas, demonstrou ser altamente eficiente para maximizar o estande inicial, especialmente em áreas onde a manutenção da cobertura do solo favorece a germinação e o estabelecimento das plantas. No entanto, preparos mais intensivos, como o S+A, podem ser menos vantajosos em curto prazo, dependendo das condições específicas do solo e do clima.

Esses achados corroboram estudos anteriores que indicam que práticas conservacionistas, como o plantio direto, podem melhorar o estabelecimento das plantas ao preservar a estrutura do solo e manter níveis adequados de umidade (Blanco-Canqui et al., 2020). Além disso, as variações entre cultivares reforçam a necessidade de selecionar variedades adaptadas às condições de preparo e ao tipo de solo para otimizar o desempenho agrônomo.

A produtividade de grãos na primeira safra variou significativamente entre os históricos de cultivo, com destaque para o T1 (longo período de cultivo de milho sobre milho), que superou os históricos T2 e T3. O histórico com T4 apresentou

produtividade semelhante, reforçando a contribuição positiva das leguminosas na sucessão de culturas, provavelmente devido à fixação biológica de nitrogênio e ao aporte de matéria orgânica (Figura 17 a**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), a mesma tendência foi observada na segunda safra (Figura 17 b). Em relação aos preparos do solo, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas (DMS = 0,1715). O preparo A apresentou a maior produtividade média, enquanto o SP foi o menor (Figura 17 a). Esses resultados indicam que sistemas consolidados de semeadura direta são eficientes, com diferenças sutis entre os tratamentos que envolvem operações de preparo, porém em anos mais secos as diferenças entre os preparos são visíveis (Figura 17b).

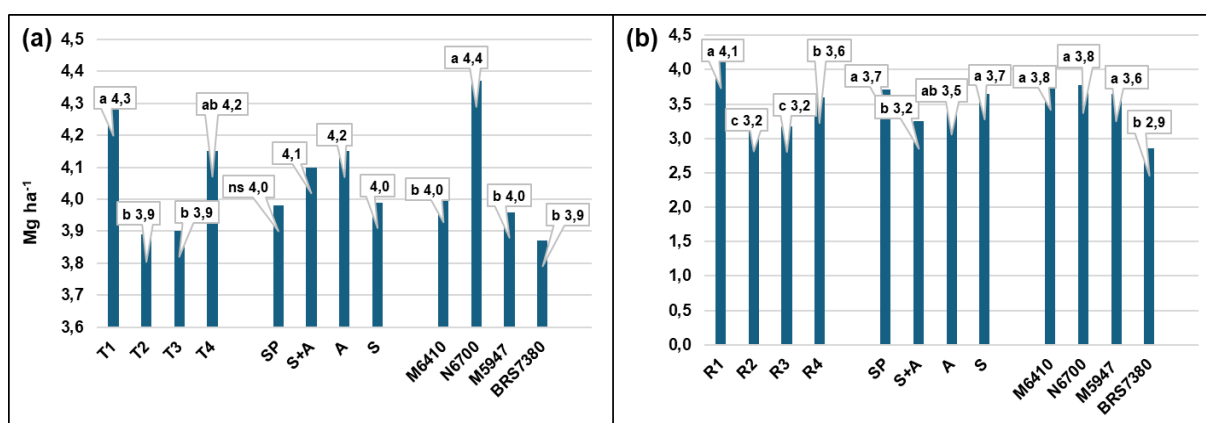


Figura 17. Produtividade dos cultivares de soja em função dos históricos, preparos de solo e cultivares. primeira safra (a); e segunda safra (b). ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4 crotalária; R1: milheto + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

Entre os cultivares, o N6700 obteve a maior produtividade média, superando em 13% o cultivar menos produtivo, BRS7380 (Figura 17 a), isso mostra a importância de selecionar cultivares geneticamente adaptados às condições de manejo e ambiente.

A produtividade de grãos da soja na primeira safra variou significativamente em função das interações entre os cultivares e os preparos do solo, conforme evidenciado na Figura 18. Entre os cultivares avaliados, o N6700 destacou-se como o mais produtivo em todos os preparos, atingindo a maior média de 4,4 Mg.ha⁻¹ nos preparos A (arado) e S (subsolador). Esse desempenho foi estatisticamente superior aos

demais cultivares, reforçando sua alta capacidade produtiva e adaptabilidade às condições avaliadas.

Por outro lado, o BRS7380 apresentou a menor produtividade média, variando entre 3,7 e 3,8 Mg.ha⁻¹, independentemente do preparo do solo. Esses resultados ressaltam a importância da escolha do material genético adequado para maximizar a produtividade, uma vez que as respostas entre cultivares foram amplamente diferenciadas, mesmo sob condições similares de manejo.

Em relação aos preparos do solo, não foram observadas diferenças significativas dentro de cada cultivar, exceto para o M6410, onde o preparo A resultou em uma produtividade 10% superior ao SP. Esse resultado indica que, enquanto o plantio direto contínuo é eficiente em sistemas estabilizados, os preparos mecânicos ocasionais, como o arado ou subsolador, podem contribuir para ganhos pontuais em cultivares com características específicas de desenvolvimento radicular. Além disso os resultados relacionados ao preparo estratégico do solo ainda são controversos no que se refere aos impactos na produtividade da soja (Fidalski et al., 2015; Peixoto et al., 2019).

No geral, os dados sugerem que o N6700 não só apresentou maior produtividade absoluta como também mostrou menor sensibilidade ao tipo de preparo, destacando sua estabilidade produtiva. Por outro lado, cultivares como o M6410 e o BRS7380 apresentaram maior variabilidade, indicando que sua produtividade pode ser mais dependente do manejo do solo.

Esses resultados corroboram com estudos prévios que indicam que a escolha de cultivares geneticamente superiores pode mitigar os impactos negativos de preparos inadequados e maximizar a eficiência do uso de recursos naturais (Blanco-Canqui e Lal, 2020; Ferreira et al., 2022). Além disso, reforçam que o preparo do solo deve ser estrategicamente utilizado em sistemas de plantio direto de longa duração, considerando não apenas as necessidades agrônômicas, mas também os impactos em longo prazo na estrutura e biologia do solo.

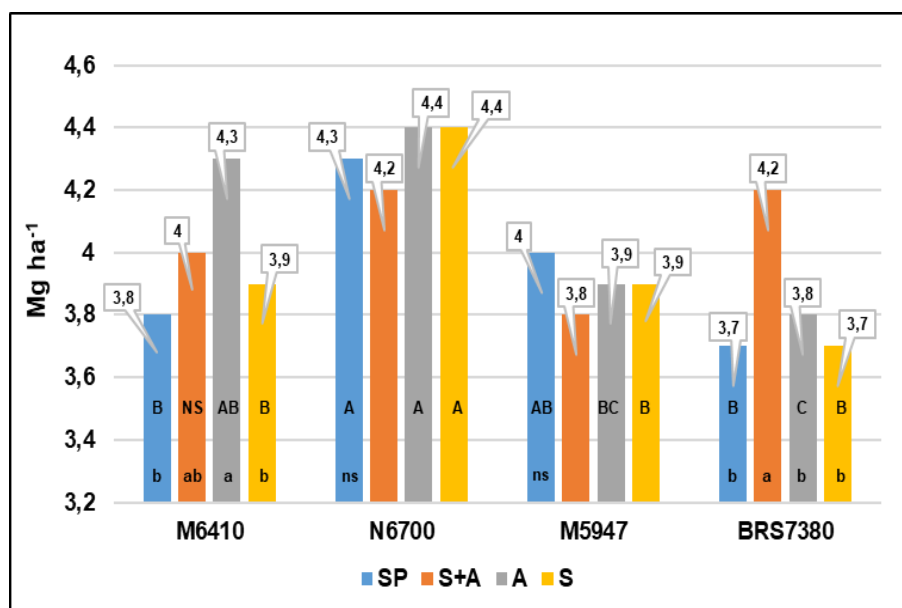


Figura 18. Produtividade de grãos em função dos preparos de solo e cultivares de soja na primeira safra. Letras maiúsculas indicam a comparação entre as médias dos cultivares dentro de cada preparo, enquanto letras minúsculas indicam a comparação entre as médias dos preparos dentro de cada cultivar. Diferenças significativas foram determinadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

A produtividade em função dos históricos de rotação de culturas e cultivares de soja avaliados na primeira safra (Figura 19), evidenciam interações significativas entre os históricos e os cultivares, destacando a importância dessas variáveis no desempenho agrônomo. Entre os cultivares avaliados, o N6700 obteve os maiores valores de produtividade em todos os históricos, atingindo até $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ no histórico T1. Esse desempenho foi significativamente superior ao dos outros cultivares, reforçando a estabilidade produtiva do cultivar N6700 em diferentes condições de preparo. Em contrapartida, o M5947 apresentou a menor produtividade geral, demonstrando maior sensibilidade às condições impostas pelos históricos.

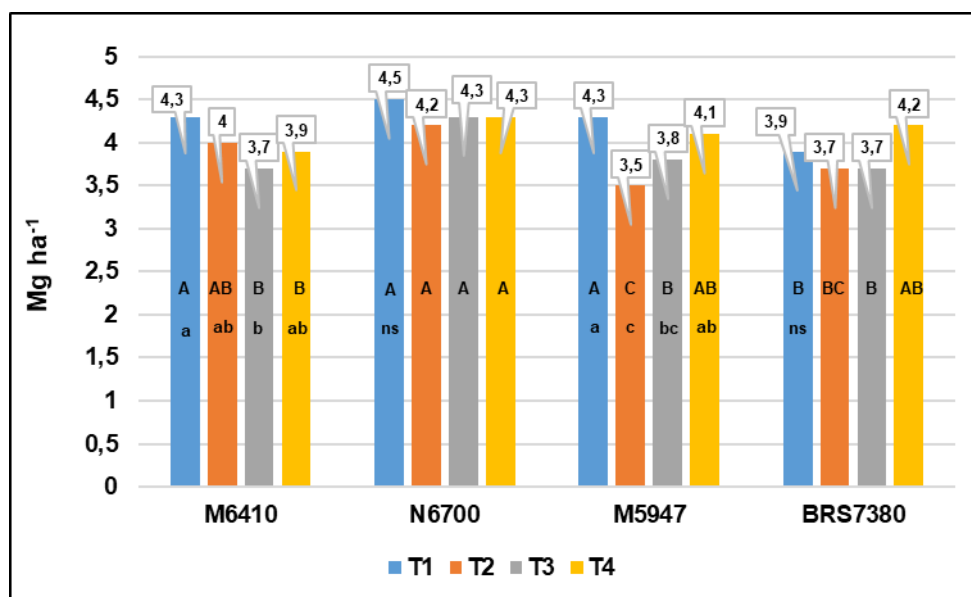


Figura 19. Produtividade de grãos em função dos históricos de rotação de culturas e cultivares de soja avaliados na primeira safra. Letras maiúsculas indicam a comparação entre as médias dos cultivares dentro de cada histórico, enquanto letras minúsculas indicam a comparação entre as médias dos históricos dentro de cada cultivar. Diferenças significativas determinadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4 crotalária; M6410, N6700, M5947 e BRS7380: cultivares de soja.

Os históricos também influenciaram significativamente os resultados. O histórico T1 apresentou as maiores produtividades médias para os cultivares M6410 e M5947, em relação ao T3 (girassol/sorgo), que foi o menos produtivo, enquanto os cultivares N6700 e BRS7380 não sofreram influência dos históricos.

As diferenças estatísticas indicadas pelas letras maiúsculas (entre cultivares dentro de cada histórico) e minúsculas (entre históricos dentro de cada cultivar) reforçam a relevância da interação genótipo x ambiente. O desempenho superior do histórico T1 e do cultivar N6700 corrobora a literatura, que aponta o histórico da área com milho contínuo e cultivares geneticamente superiores como fatores-chave para maximizar a produtividade (Ferreira et al., 2022; Blanco-Canqui e Lal, 2020).

4.3 Resistência mecânica do solo à penetração

Verifica-se na Figura 20, os gráficos demonstrando a variação em profundidade, nos quais os valores medidos são elevados, mesmo em épocas de avaliação com mais umidade no solo. Nota-se que o preparo estratégico possibilitou

redução significativa da RMSP, que se manteve até a leitura realizada 15 meses após as operações de preparo (Figura 20 19/12/23). De acordo com Kuhwald et al. (2020), o efeito do preparo convencional realizado após 18 anos com adoção do cultivo mínimo foi observado por apenas 18 meses. O mesmo efeito temporário do preparo convencional, em comparação ao plantio direto para a cana-de-açúcar foi observado em outros artigos (Barbosa et al., 2018; Martini et al., 2021). Utilizando a mesma metodologia, porém em cultivo de amendoim em diferentes preparos de solo sobre palhada de cana crua, constatou-se o mesmo resultado encontrado na presente pesquisa, ou seja, o efeito efêmero do distúrbio físico gerado pelo revolvimento com o passar do tempo (Betiol et al., 2023). Além disso, algumas alterações em atributos do solo decorrentes do preparo não persistem por mais de dois anos, (Figura 20. Resistência mecânica do solo à penetração nas seguintes datas: 23 de setembro de 2022 (antes das operações de preparo), 9 de fevereiro de 2023 (80 DAS da soja da primeira safra), 4 de abril de 2023 (após a colheita da soja), 20 de julho de 2023 (durante o ciclo das plantas de cobertura, aos 92 DAS), e 19 de dezembro de 2023 (durante a segunda safra de soja, aos 26 DAS). Comparação de médias em cada camada de solo (profundidade). ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado e S+A: subsolado e arado.(Blanco-Canqui et al., 2020). Mesmo assim, a prática de preparo do solo continua sendo amplamente adotada em áreas paulistas, muitas vezes sem a real compreensão das perdas associadas, como a degradação de indicadores de qualidade do solo e as perdas de solo por erosão em diferentes sistemas produtivos.

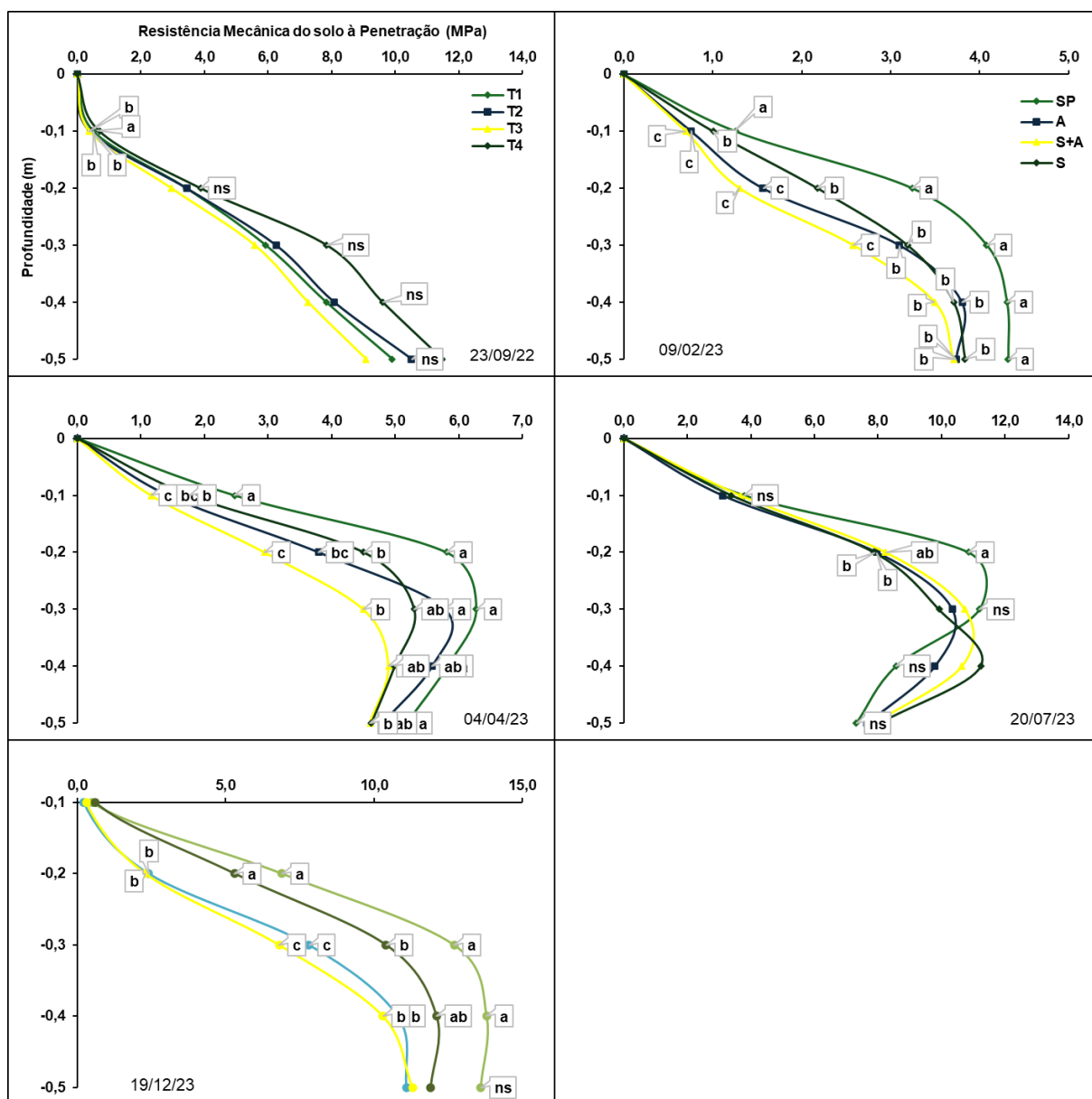


Figura 20. Resistência mecânica do solo à penetração nas seguintes datas: 23 de setembro de 2022 (antes das operações de preparo), 9 de fevereiro de 2023 (80 DAS da soja da primeira safra), 4 de abril de 2023 (após a colheita da soja), 20 de julho de 2023 (durante o ciclo das plantas de cobertura, aos 92 DAS), e 19 de dezembro de 2023 (durante a segunda safra de soja, aos 26 DAS). Comparação de médias em cada camada de solo (profundidade). ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado e S+A: subsolado e arado.

É importante considerar que a resistência mecânica do solo à penetração (RP) depende do teor de água no solo, sendo que ambos são afetados pela textura, estrutura, agregação e densidade do solo (Glinski & Lipiec, 1990; Vaz et al., 2013). Também é preciso dizer que as avaliações de RP foram feitas abaixo da capacidade de campo, portanto se obtém valores superiores nas avaliações (Figura 21). De

acordo com Moraes et al. (2013), o RP é mais sensível à compactação do solo quando as avaliações são feitas em condição de solo seco (Figura 21, 20/07/23). O aumento da RP com a diminuição do teor de água no perfil do solo e o impacto do tráfego na compactação nas camadas mais profundas do solo é relatado por Moraes et al. (2013) em estudo na condição semeadura direta. Este é o motivo pelo qual são recomendadas metodologias para padronizar a umidade do solo (Vaz et al., 2013; Fernandes et al., 2020). Por outro lado, as metodologias disponíveis ainda são onerosas, devido à necessidade de amostragens de campo e análises laboratoriais (Fernandes et al., 2020) e esse não era o objetivo principal da presente pesquisa.

No entanto, é importante ressaltar que valores de RP superiores a 2,5 MPa (Camargo & Alleoni, 1997) dependendo da umidade do solo, são considerados restritivos ao desenvolvimento das raízes das plantas para a maioria das culturas.

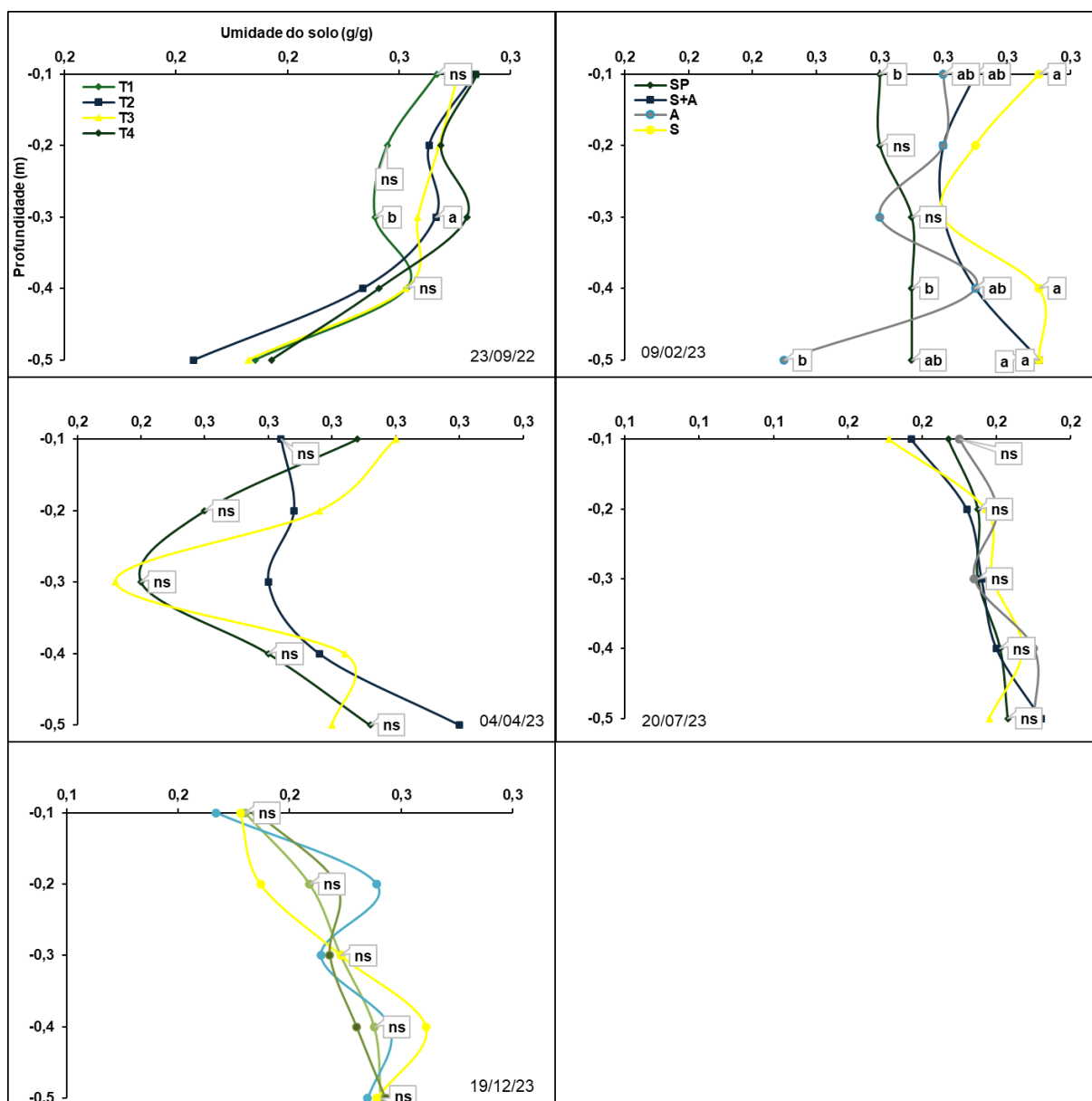


Figura 21. Conteúdo gravimétrico de água no solo nas datas avaliadas. Comparação de médias em cada camada de solo (profundidade). ns: não significativo no teste de Tukey a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; A: arado; S: subsolado e S+A: subsolado e arado.

Resistências do solo à penetração, medidas com penetrômetros, podem ser usadas como indicadores de limitações físicas do solo para o crescimento radicular de culturas agrícolas (Moraes et al., 2014). Valores de resistência do solo à penetração de 2 MPa (sistema convencional), 3 MPa (sistema de preparo mínimo) e 3,5 MPa (sistema plantio direto) têm sido relatados como valores limitantes ao crescimento radicular de culturas agrícolas. De forma geral, o que se conhece é que a estrutura do solo e as espécies vegetais (Bengough et al., 2011) impactam nos

limites críticos de resistência do solo à penetração das raízes, portanto, é necessário calibração destes valores para as diferentes condições edafoclimáticas (Moraes et al., 2018).

4.4 Plantas de cobertura

Na Figura 22, pode-se observar que, no período considerado, as maiores produções de biomassa seca da parte aérea foram quantificadas no mix com 7 espécies (R3), seguido do tremoço branco (R4), mix de aveia preta/milheto (R1) e vegetação espontânea (R2), com respectivamente; 5.3, 4.4, 4.2 e 0,92 Mg.ha⁻¹. Vale ressaltar que, no período considerado, a chuva acumulada foi de aproximadamente 80 mm e, por conseguinte, as plantas de cobertura foram capazes de produzir 57,8 kg de matéria seca para cada mm de chuva acumulado. Isso significa que essas espécies produziram 5 vezes mais biomassa seca que a vegetação espontânea. Convém destacar também que não houve efeito dos preparos no acúmulo de biomassa seca das espécies, denotando a eficiência da operação de semeadura com a caixa acoplada para sementes menores.

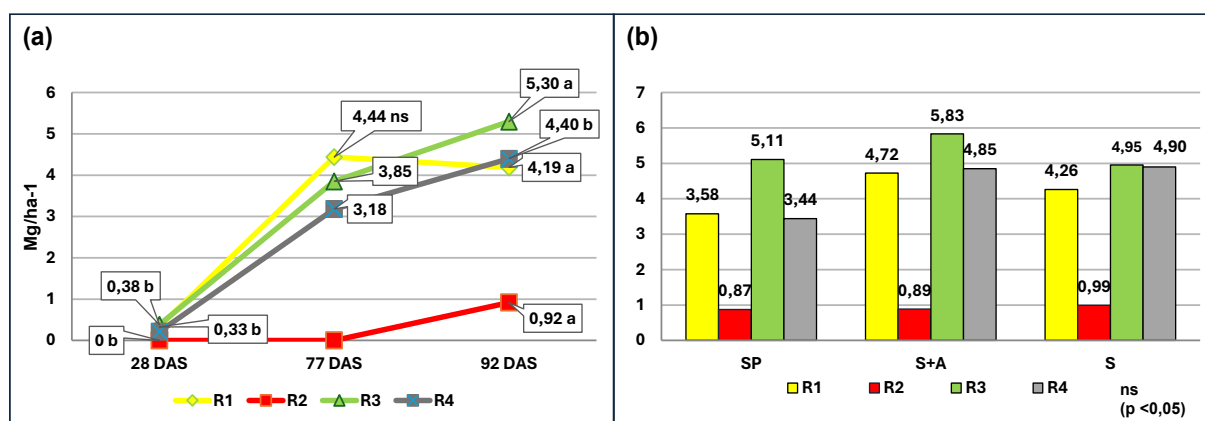


Figura 22. Acúmulo de biomassa seca na parte aérea das plantas de cobertura ao decorrer do ciclo (a) as medias comparam a biomassa em cada data avaliada; e acúmulo de matéria seca em função dos preparos de solo aos 92 DAS (b). ns: não significativo pelo teste de Tukey. SP: sem preparo; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

A quantidade de nutrientes extraídos por cada uma das opções de plantas de cobertura está apresentada nos gráficos da Figura 23. Em comparação a R2 (pousio)

(caracterizado pela predominância da planta daninha *Alternanthera ficoidea*, conhecida como apaga-fogo), todas as opções de plantas de cobertura proporcionaram quantidades significativamente maiores de nutrientes ciclados ou fixados. A R4 (tremoço branco) destacou-se ao acumular 141-8,4-74 kg/ha de N-P-K.

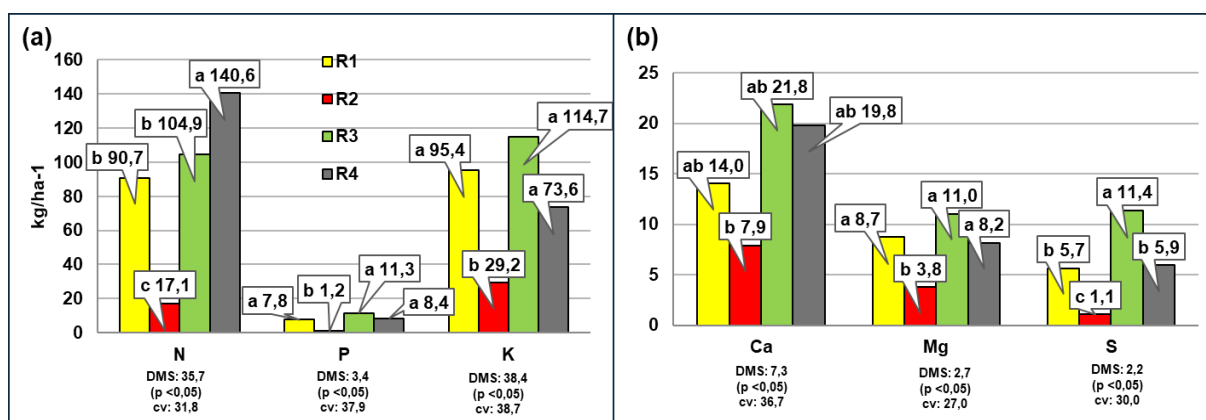


Figura 23. Quantidade de macro nutrientes (a); e micro (b), extraídos pelas opções de plantas de cobertura aos 92 DAS pela análise foliar, * significativo teste de Tukey ($p < 0,05$). R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

Entre as opções avaliadas, o conteúdo de macronutrientes na biomassa da R3 (mix de plantas) não diferiu significativamente daqueles presentes nos resíduos do consórcio R1 (milho + aveia), com exceção do enxofre (S) e cálcio (Ca), que apresentaram maiores concentrações na R3. Esses resultados reforçam a capacidade das plantas de cobertura em ciclar nutrientes essenciais para o desenvolvimento da soja.

Embora o nitrogênio não seja um fator limitante para a cultura da soja devido à fixação biológica de nitrogênio, a quantidade de potássio (K) ciclado pelas opções de plantas de cobertura (acima de 90 kg/ha) é particularmente relevante. Esse aporte de K representa um benefício significativo para a soja cultivada em sucessão, contribuindo para a melhoria da nutrição mineral e, conseqüentemente, para os ganhos em produtividade observados em comparação com o tratamento testemunha R2.

Os benefícios proporcionados pelo cultivo das espécies avaliadas vão além do enriquecimento da fertilidade do solo. O conceito de saúde do solo, que tem recebido

grande destaque na literatura atual, pode ser ainda mais relevante do que as quantidades de nutrientes liberadas após a decomposição dos resíduos das plantas de cobertura (Figura 23). Como demonstrado na Figura 24c, a população de nematoides de vida livre quantificada na área de mata nativa de referência foi 72% maior do que a de nematoides fitopatogênicos. Esse resultado destaca o equilíbrio biológico e a capacidade natural de supressão de pragas em ecossistemas preservados, evidenciando a importância de práticas que promovam a diversidade biológica do solo.

Os resultados da primeira safra (Figura 24a e b) evidenciam que os tratamentos de rotação de culturas e preparo do solo influenciaram significativamente as populações de nematoides de vida livre. Entre os tratamentos de rotação, o T2 (soja/milho) apresentou a maior população de nematoides de vida livre, enquanto o T4 (crotalária/milho) registrou a menor. A redução observada no T4 pode ser explicada pelas propriedades nematicidas da crotalária, que são conhecidas por inibir nematoides fitopatogênicos, mas também podem impactar negativamente os organismos benéficos (Silva et al., 2019).

Quanto aos diferentes preparos do solo, o tratamento SP apresentou a maior população de nematoides de vida livre, enquanto o preparo S+A apresentou a menor. Esse resultado sugere que o preparo intensivo pode alterar as condições biológicas do solo, reduzindo a diversidade de organismos benéficos no curto prazo (Neher, 2020). Por outro lado, o tratamento SP, por não envolver intervenções mecânicas, manteve condições mais estáveis para o desenvolvimento das populações de nematoides.

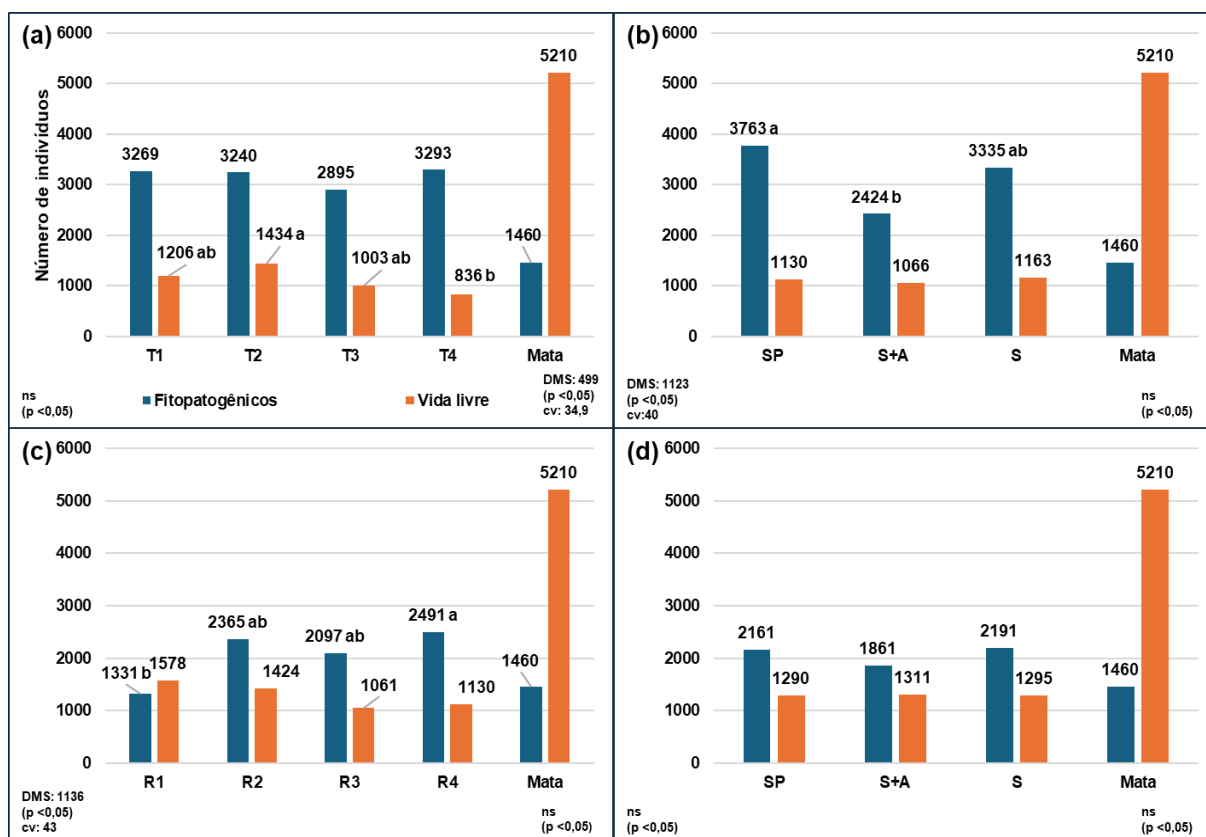


Figura 24. População de nematoides de vida livre e fitopatogênicos durante o ciclo da soja em diferentes tratamentos de histórico de rotação de culturas (a) e plantas de cobertura (c) e preparos do solo (b, d). Amostragem realizada aos 63 DAS na primeira safra (a, b) e aos 60 DAS na segunda safra (c, d). ns: diferença não significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). SP: sem preparo; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4: crotalária; R1: milheto + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

Entre os tratamentos avaliados, o cultivo de milheto + aveia destacou-se como uma opção promissora, apresentando uma redução significativa na população de nematoides fitopatogênicos e um aumento expressivo na população de nematoides de vida livre, quando comparado aos demais tratamentos (Figura 24c e d). Os nematoides de vida livre desempenham um papel fundamental na decomposição da matéria orgânica e no controle biológico natural de organismos fitopatogênicos, contribuindo para o equilíbrio funcional do solo. Esses resultados reforçam a relevância do uso de plantas de cobertura na promoção de uma microbiota do solo diversificada e saudável.

Por outro lado, não foi observada diferença estatística significativa entre os diferentes tratamentos de preparo do solo em relação às populações de nematoides (Figura 24d). Isso indica que os efeitos positivos sobre os nematoides estão mais

associados à escolha das plantas de cobertura do que às intervenções mecânicas no solo. Esses achados destacam o papel central das espécies de cobertura na construção de solos mais resilientes e biologicamente equilibrados, além de contribuírem para sistemas de manejo agrícola mais sustentáveis e menos dependentes de insumos químicos.

4.5 Atributos físicos e químicos do solo

Na Tabela 4 encontram-se os resultados da porosidade total (PT), macro porosidade (Mac), micro porosidade (Mic), umidade na capacidade de campo e densidade do solo relativas às amostragens realizadas antes de serem realizados os preparos em 2022. Para nenhuma das camadas consideradas, constatou-se diferença estatística entre os tratamentos antigos de rotação de cultura, demonstrando uma relativa uniformidade para esses atributos físicos. Exceto na camada 40-60 cm para Mac, constatou-se diferença estatística entre amostras coletadas nas parcelas com histórico de adoção de adubação verde em relação ao milho e tratamento com diversas culturas. A amostragem realizada após a colheita da soja em 2023 (Tabela 5), não acusou diferenças estatísticas entre os preparos para nenhum atributo e profundidade consideradas. Provavelmente os preparos realizados não foram tão intensos a ponto de ocasionar alterações significativas nos atributos físicos avaliados.

Tabela 4. Atributos físicos do solo nos históricos de culturas antes dos preparos. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2022.

Camada cm ⁽¹⁾	T1	T2	T3	T4	Test F	CV (%)	Referência (mata)
Porosidade total (m ³ m ⁻³)							
0 - 5	0,59	0,58	0,51	0,55	1,66 ^{ns}	9,77	0,66
5 - 10	0,53	0,53	0,50	0,52	0,45 ^{ns}	7,44	0,65
10 - 20	0,52	0,54	0,49	0,51	0,83 ^{ns}	8,32	0,61
20 - 40	0,57	0,56	0,51	0,55	0,66 ^{ns}	12,45	0,60
40 - 60	0,58	0,59	0,53	0,57	1,33 ^{ns}	8,85	0,58
60 - 100	0,53	0,53	0,57	0,59	0,78 ^{ns}	12,12	0,58
Micro porosidade total (m ³ m ⁻³)							
0 - 5	0,41	0,45	0,39	0,42	0,79 ^{ns}	13,49	0,39
5 - 10	0,42	0,39	0,38	0,42	1,33 ^{ns}	10,12	0,38
10 - 20	0,42	0,42	0,39	0,41	0,68 ^{ns}	9,01	0,39
20 - 40	0,44	0,43	0,38	0,41	0,68 ^{ns}	15,03	0,42
40 - 60	0,42	0,42	0,38	0,39	0,88 ^{ns}	11,40	0,43
60 - 100	0,34	0,33	0,39	0,40	1,47 ^{ns}	15,51	0,42
Macro porosidade total (m ³ m ⁻³)							
0 - 5	0,17	0,11	0,11	0,12	3,81 ^{ns}	21,80	0,27
5 - 10	0,11	0,14	0,13	0,10	2,27 ^{ns}	20,06	0,27
10 - 20	0,10	0,12	0,10	0,10	0,51 ^{ns}	21,42	0,22
20 - 40	0,13	0,13	0,12	0,14	0,27 ^{ns}	19,72	0,18
40 - 60	0,15b	0,17ab	0,15b	0,18a	5,75*	7,58	0,15
60 - 100	0,20	0,19	0,17	0,19	0,48 ^{ns}	14,63	0,16
Capacidade de campo (m ³ m ⁻³)							
0 - 5	0,38	0,43	0,36	0,39	0,96 ^{ns}	14,68	0,38
5 - 10	0,40	0,37	0,35	0,40	1,50 ^{ns}	10,67	0,36
10 - 20	0,39	0,39	0,36	0,38	0,81 ^{ns}	9,90	0,37
20 - 40	0,41	0,40	0,35	0,38	0,89 ^{ns}	15,74	0,39
40 - 60	0,38	0,38	0,34	0,35	1,05 ^{ns}	12,45	0,40
60 - 100	0,30	0,30	0,36	0,36	1,43 ^{ns}	16,67	0,39
Densidade (Mg m ⁻³)							
0 - 5	1,22	1,26	1,31	1,28	1,20 ^{ns}	5,50	1,02
5 - 10	1,38	1,31	1,34	1,35	0,73 ^{ns}	5,20	1,09
10 - 20	1,38	1,32	1,38	1,33	0,70 ^{ns}	6,27	1,13
20 - 40	1,28	1,29	1,35	1,23	0,95 ^{ns}	7,49	1,15
40 - 60	1,20	1,17	1,27	1,15	1,99 ^{ns}	6,34	1,22
60 - 100	1,18	1,18	1,14	1,13	0,61 ^{ns}	5,58	1,19

⁽¹⁾As médias nas linhas comparam os resultados na mesma profundidade; * significativo teste de Tukey (p < 0,05); ns: não significativo a 5% de probabilidade; T1: milho; T2: soja; T3 girassol e T4: crotalária.

Tabela 5. Atributos físicos do solo no histórico de culturas e nos preparos de solo na cultura da soja. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2023.

Camada ⁽¹⁾	Históricos ⁽²⁾						Preparos ⁽²⁾					Referência (mata)
m	R1	R2	R3	R4	Test F	CV %	SP	S+A	S	Test F	CV %	
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)												
0 - 5	0,55	0,55	0,54	0,53	0,60 ^{ns}	7,93	0,53	0,56	0,54	0,59 ^{ns}	5,39	0,66
5 - 10	0,54	0,53	0,53	0,52	0,27 ^{ns}	7,75	0,53	0,54	0,52	0,45 ^{ns}	4,53	0,65
10 - 20	0,51	0,55	0,53	0,53	0,49 ^{ns}	14,62	0,51	0,53	0,55	0,52 ^{ns}	9,03	0,61
20 - 40	0,53	0,54	0,52	0,54	0,315 ^{ns}	10,92	0,52	0,54	0,53	1,22 ^{ns}	5,05	0,60
40 - 60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,01 ^{ns}	6,52	0,54	0,55	0,55	0,90 ^{ns}	3,33	0,58
60 - 100	0,57	0,57	0,57	0,55	0,49 ^{ns}	8,17	0,56	0,57	0,56	0,96 ^{ns}	4,56	0,58
Micro porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)												
0 - 5	0,42	0,41	0,43	0,42	0,34 ^{ns}	8,98	0,43	0,41	0,43	1,31 ^{ns}	7,08	0,39
5 - 10	0,42	0,41	0,42	0,41	0,11 ^{ns}	9,13	0,41	0,41	0,42	0,01 ^{ns}	5,01	0,38
10 - 20	0,42	0,41	0,41	0,42	0,72 ^{ns}	5,07	0,42	0,42	0,41	0,26 ^{ns}	4,20	0,39
20 - 40	0,42	0,41	0,41	0,41	0,31 ^{ns}	5,81	0,41	0,42	0,41	0,52 ^{ns}	5,08	0,42
40 - 60	0,41	0,41	0,40	0,40	1,11 ^{ns}	6,25	0,40	0,40	0,40	0,12 ^{ns}	3,65	0,43
60 - 100	0,40	0,40	0,38	0,40	0,47 ^{ns}	10,80	0,40	0,40	0,39	1,38 ^{ns}	6,04	0,42
Macro porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)												
0 - 5	0,12	0,13	0,10	0,11	0,38 ^{ns}	63,78	0,10	0,14	0,11	2,14 ^{ns}	43,84	0,27
5 - 10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06 ^{ns}	57,38	0,11	0,12	0,10	1,70 ^{ns}	26,53	0,27
10 - 20	0,09	0,13	0,11	0,10	0,46 ^{ns}	82,16	0,09	0,11	0,13	0,20 ^{ns}	44,07	0,22
20 - 40	0,11	0,12	0,11	0,12	0,30 ^{ns}	48,34	0,11	0,12	0,12	0,62 ^{ns}	30,59	0,18
40 - 60	0,13	0,13	0,15	0,14	0,34 ^{ns}	35,01	0,14	0,14	0,14	0,41 ^{ns}	20,01	0,15
60 - 100	0,16	0,17	0,18	0,15	0,81 ^{ns}	34,11	0,16	0,17	0,17	1,14 ^{ns}	18,36	0,16
Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)												
0 - 5	0,40	0,38	0,40	0,40	0,82 ^{ns}	9,17	0,40	0,38	0,40	0,34 ^{ns}	8,41	0,38
5 - 10	0,39	0,38	0,39	0,39	0,22 ^{ns}	8,08	0,39	0,38	0,39	0,36 ^{ns}	5,06	0,36
10 - 20	0,40	0,38	0,39	0,39	1,00 ^{ns}	5,20	0,40	0,39	0,39	1,05 ^{ns}	3,82	0,37
20 - 40	0,39	0,38	0,39	0,39	0,46 ^{ns}	4,81	0,39	0,39	0,38	0,79 ^{ns}	5,40	0,39
40 - 60	0,38	0,38	0,37	0,37	1,59 ^{ns}	4,58	0,38	0,37	0,37	1,19 ^{ns}	4,21	0,40
60 - 100	0,36	0,35	0,35	0,36	1,23 ^{ns}	6,36	0,36	0,36	0,35	0,61 ^{ns}	5,38	0,39
Densidade (Mg m^{-3})												
0 - 5	1,27	1,23	1,29	1,30	0,770 ^{ns}	9,06	1,29	1,25	1,28	0,56 ^{ns}	8,88	1,02
5 - 10	1,33	1,32	1,37	1,34	0,31 ^{ns}	9,50	1,36	1,30	1,36	0,54 ^{ns}	5,19	1,09
10 - 20	1,38	1,34	1,37	1,37	0,37 ^{ns}	7,82	1,37	1,36	1,36	1,99 ^{ns}	3,77	1,13
20 - 40	1,35	1,31	1,35	1,30	0,57 ^{ns}	8,49	1,35	1,31	1,32	1,48 ^{ns}	5,73	1,15
40 - 60	1,29	1,27	1,26	1,25	0,70 ^{ns}	5,41	1,28	1,25	1,27	0,61 ^{ns}	5,21	1,22
60 - 100	1,18	1,17	1,16	1,23	1,06 ^{ns}	7,56	1,20	1,17	1,19	1,39 ^{ns}	5,69	1,19

⁽¹⁾As médias nas linhas comparam os resultados na mesma profundidade; ⁽²⁾: medias referentes ao histórico e preparos; * significativo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: trevo branco.

Deve-se considerar, que o plantio direto consolidado, mesmo sem aporte expressivo de biomassa anualmente, melhorou a estrutura do solo a ponto de não ser possível detectar os efeitos deletérios do distúrbio ocasionado pelo preparo estratégico. Os valores de densidade do solo (Ds) e Mac, nas parcelas com longo histórico de cultivo com milho são os mais próximos da área de referência da mata, considerando a camada superficial. Convém salientar que o solo em questão apresenta na fração argila predominância de óxidos de ferro, fato que confere aumento dos micro-agregados e consequente maior capacidade de suportar as pressões exercidas pelo tráfego de máquinas.

Uma das justificativas do preparo estratégico é a uniformização do perfil em termos de fertilidade do solo, considerando que ocorre concentração de nutrientes nas camadas superficiais do solo, ao longo do tempo de adoção e aplicação de corretivos sem incorporação (Tabela 6). A área experimental antes da instalação dos preparos apresentava baixos valores de saturação por bases, Ca, Mg, V% e pH, na camada de 0-10 cm de profundidade, principalmente nos históricos com mais cultivo de milho, incluindo o tratamento com adubação verde de verão e milho na safrinha (Tabela 6). Isso se deve ao uso de adubação nitrogenada com frequência nos tratamentos que predominava o cultivo de milho. Observa-se também o contraste entre os teores de matéria orgânica na área agrícola em comparação com a mata de referência, sobretudo nas camadas superficiais.

Tabela 6. Características químicas do solo antes dos preparos nas camadas de 0,00 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60; 0,60 – 0,10 cm. Ribeirão Preto São Paulo, Brasil, 2022.

Profundidade	0 – 5 cm ⁽²⁾										
	mg/dm ³		CaCl ₂	mmolc/dm ³				mg/dm ³	– mmolc/dm ³ –		%
Histórico ⁽¹⁾	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	SB	T	V
T1	98ns	29ns	5ns	5,8ns	24,5b	11ns	57ns	12ab	41,3b	98,3ns	42,7ns
T2	72	23,2	5,7	6,2	39,2a	16	35	11b	61,5a	96,2	63,7
T3	76,5	23	5,4	5,9	35ab	14,2	36	11,7ab	55,2ab	92,6	60,5
T4	73,7	28,5	5	7,1	27,5b	12,7	45,2	14,5a	47,4ab	91,2	53
Referência ⁽³⁾	33	100,5	6,7	3,6	170,2	42,4	16	-	216,3	232,5	92,7
Teste F	ns	ns	4*	ns	7,2**	ns	ns	4,2*	4,4*	ns	ns
DMS	39,6	14,9	0,7	2,4	11	5,6	33,6	3,2	18,5	26,1	24,9
cv (%)	22,4	26,1	6	17,8	15,8	18,9	35,1	11,9	16,3	12,5	20,5
Profundidade	5 – 10 cm ⁽²⁾										
	mg/dm ³		CaCl ₂	mmolc/dm ³				mg/dm ³	– mmolc/dm ³ –		%
T1	73,5ns	25,7ns	4,7ab	4,6ns	19,5a	8,7a	68,5ab	10,5a	32,9a	101,4ab	32,5a

T2	53,5	23,2	4,9a	3,5	23,2a	9,5a	54,2b	8,2a	36,2a	90,5ab	40,5a
T3	76,7	19,5	4,7ab	2,7	19a	9a	56,5b	9a	30,7a	87,2b	35,2a
T4	69,2	19,5	4,3b	2,8	11,7b	5,7b	84,2a	12,2a	20,3b	104,5a	19,5b
Referência ⁽³⁾	21,7	51,5	6,6	2,7	117,5	28	15,5	-	148,2	163,7	90,5
Teste F	ns	ns	4,2*	ns	10,4**	10,8**	12,8**	ns	13**	4,7*	7,2**
DMS	40,6	10	0,5	2,1	6,5	2,2	16,9	5,3	8,3	16,8	9,4
cv (%)	27	20,7	5,1	28,8	16,2	12,4	11,6	24,2	12,6	7,9	13,4
10 – 20 cm ⁽²⁾											
T1	49,2ns	19ns	4,8ns	3,3ns	16ns	6ns	58ns	10,2ns	25,3ns	83,3ns	30,7ns
T2	43,5	20,7	5	2,9	20,7	7,7	48,7	8,2	31,4	80,2	39,7
T3	42	22	4,9	2,6	18	7,5	54	10,5	28,1	82,1	34,7
T4	35,7	17,7	4,7	2,7	13,7	5,5	58	12,7	21,9	79,9	27,2
Referência ⁽³⁾	15,5	28,7	6,3	2,1	81,2	20,7	18	-	104,1	122	85,5
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS	29,2	9,8	0,6	0,8	9,3	2,9	22,7	8	12,6	13,2	18,2
cv (%)	31	22,5	5,9	13,3	24,6	20,2	18,8	34,9	21,4	7,3	24,9
20 – 40 cm ⁽²⁾											
T1	22,7ns	14ns	5,1ns	2,9ns	17,7ns	5,7ns	43ns	9,5ns	26,4ns	69,4ns	37,5ns
T2	26,2	17,2	5,1	2,9	18,7	6,2	46,7	11,7	27,9	74,7	37,2
T3	26	16,5	5,1	2,9	17,5	6,2	44	12,5	26,7	70,7	37,7
T4	26	16,5	4,9	2,6	16,5	6	46,7	11,2	25,1	71,9	35,2
Referência ⁽³⁾	21,2	21,7	6,3	2,1	62	17,5	16,2	-	81,6	97,7	83,5
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS	8,4	6,5	0,4	2,3	7,8	2,5	16,2	8,3	11,7	15	16,2
cv (%)	15,1	18,3	3,7	37,6	20,2	18,6	16,2	33,6	19,9	9,5	19,9
40 – 60 cm ⁽²⁾											
T1	13,2ns	11,5ns	5,4ns	2,6ns	17,7ns	5,7ns	33ns	11,7ns	26,1ns	59,1ns	44,2ns
T2	12,7	14	5,3	2,4	17	5,5	34,5	21,2	24,9	59,4	41,7
T3	14,2	13,5	5,5	1,7	15,2	6,2	32,2	16,7	23,2	55,5	41,7
T4	18	13,5	5,3	2,4	15,5	5,5	34,2	11,5	23,4	57,6	41
Referência ⁽³⁾	28	17,2	6,2	1,9	44,7	15	17,5	-	61,7	79,2	78
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS	9,8	3,2	0,4	1,4	3,8	2,2	9	15	5,6	6,8	10,7
cv (%)	30,6	11,2	3,5	27,9	10,7	17,3	12,2	44,4	10,4	5,3	11,5
60 – 100 ⁽²⁾ cm											
T1	9ns	10,5ns	5,4ns	1,8ns	14ns	5,5ns	28,5ns	25,2ns	21,3ns	49,8ns	43ns
T2	18,5	11	5,4	1,5	12	5	31	32,5	18,5	49,5	37,2
T3	8,2	11	5,4	1	12	5,2	28,2	22,7	18,2	46,5	39,2
T4	10,2	10,5	5,4	1,3	13,5	5,2	29,7	21	20,1	49,8	40,2
Referência ⁽³⁾	25,2	13,7	6,2	1,1	26,2	12,5	17,7	-	39,9	57,5	69,2
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS	23,9	2,4	0,4	1,4	4,8	2,5	8,8	22,9	6,7	9,6	12,4
cv (%)	94,4	10,2	3,7	46	16,9	21,9	13,6	40,9	15,6	8,9	14

(1) as médias nas colunas comparam o histórico de culturas na mesma profundidade; (2): profundidade de amostragem; * significativo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo a 5% de probabilidade; (3): resultados da amostragem feita na mata (não incluída na análise estatística). ; T1: milho; T2: soja; T3 girassol e T4: crotalaria.

Na presente pesquisa, verificou-se que a incorporação dos resíduos com arado de aiveca e gradagem proporcionou elevação dos teores de fósforo e da V% na camada de 10-20 cm de profundidade (Tabela 7), lembrando que foi aplicado calcário dolomítico antes dos preparos. Os efeitos do preparo proporcionaram mudanças na fertilidade do solo apenas na camada mais superficial (Tabela 7). Estudos anteriores obtiveram resultados semelhantes utilizando arado de aiveca, com o objetivo de reverter a camada superficial do solo (Garcia et al., 2007). A aplicação superficial de fertilizantes nitrogenados nas camadas superiores foi associada à redução da acidez do solo nas parcelas que não passaram por preparo (Tabela 7)(Kettler et al., 2000).

Tabela 7. Características químicas do solo após os preparos nas camadas de 0 – 5, 5 – 10, 10 – 20, 20 – 40, – 60, 60 – 100 cm. Ribeirão Preto São Paulo, Brasil, 2023.

Profundidade	0 – 5 cm ⁽²⁾										
	mg/dm ³		CaCl ₂	mmolc/dm ³				mg/dm ³	mmolc/dm ³		%
Preparo ⁽¹⁾	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	SB	T	V
SP	57,5a	30,2a	6a	4,4ns	54a	27a	22,8b	8,8ns	85,8a	108,6a	78,3a
S	62,8a	28,7a	5,9a	4,1	52a	25a	24b	9	81,1a	105,1a	76,5a
S+A	36,4b	22b	5,2b	4,7	23,9b	11b	34,4a	9,1	39,7b	74,1b	53,1b
Referência ⁽³⁾	33	100,5	6,7	3,6	170,2	42,4	16	-	216,3	232,5	92,7
Teste F	21,1**	44,1**	36,3**	Ns	52**	46,3**	4,7**	Ns	51,8**	51,7**	41**
DMS	10,7	2,3	0,2	0,7	8,2	4,5	5,8	1,2	12,4	9,3	7,7
cv (%)	23,2	9,7	5,2	18,1	21,6	24,2	24,5	15,9	20,4	10,9	12,6
Profundidade	5 – 10 cm ⁽²⁾										
	mg/dm ³		CaCl ₂	mmolc/dm ³				mg/dm ³	mmolc/dm ³		%
Preparo ⁽¹⁾	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	SB	T	V
SP	43ns	24,3a	4,9ns	4,1a	23,1ns	12,4ab	38ns	7,5ns	39,7ns	77,7ns	51,4ns
S	48,4	23,8a	5	3,6ab	26	13,5a	36,4	7,8	43,1	79,6	54,2
S+A	39,5	20,4b	5	2,9b	22,7	10,6b	35,4	8,1	36,3	71,7	50,1
Referência ⁽³⁾	21,7	51,5	6,6	2,7	117,5	28	15,5	-	148,2	163,7	90,5
Teste F	ns	10**	1,2ns	6,4**	ns	ns	ns	ns	ns	Ns	ns
DMS	14,1	2,3	0,2	0,8	5,1	5,3	8	1,3	7,6	10,4	7,6
cv (%)	36,5	11,6	5,2	26,5	24,1	26	25	18,8	21,8	15,4	16,6
Profundidade	10 – 20 cm ⁽²⁾										
	mg/dm ³		CaCl ₂	mmolc/dm ³				mg/dm ³	mmolc/dm ³		%
Preparo ⁽¹⁾	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	SB	T	V
SP	32,7ns	17,8ns	4,8b	3,5ns	16,3b	6,8b	37,3ab	11,6ns	26,7b	64,1b	42b
S	37,8	18	4,7b	3,3	17,4b	7,1b	39,9a	11,1	28b	67,9ab	41,2b
S+A	36,3	18,6	5,1a	2,9	25,3a	11,8a	33,4b	11,5	40,1a	73,5a	53,1a
Referência ⁽³⁾	15,5	28,7	6,3	2,1	81,2	20,7	18	-	104,1	122	85,5
Teste F	ns	ns	16**	Ns	11,6**	20,4**	4,1*	ns	11,8**	4,2*	11,2**
DMS	14,8	1,5	0,1	0,7	5,1	2,1	5,6	3,5	7,5	8,1	7
cv (%)	47,1	9,8	4,5	24,1	29,3	28,3	17,4	35,5	27	13,4	17,5
Profundidade	20 – 40 cm ⁽²⁾										
	mg/dm ³		CaCl ₂	mmolc/dm ³				mg/dm ³	mmolc/dm ³		%
Preparo ⁽¹⁾	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	SB	T	V
SP	21,6ns	16,3b	5ns	2,8ns	19,1b	6,9b	33,4ns	14,7ns	28,8b	62,3ns	46,1b
S	23,5	16,8ab	5	2,6	21,1ab	7,3b	33,6	12,3	31ab	64,7	47,8ab
S+A	26,4	17,5a	5,2	3,1	23,5a	8,8a	30,7	15,7	35,5a	66,3	53,1a
Referência ⁽³⁾	21,2	21,7	6,3	2,1	62	17,5	16,2	-	81,6	97,7	83,5
Teste F	ns	ns	ns	ns	3,6*	7**	Ns	Ns	4,4*	Ns	4,1*
DMS	10,5	1,1	0,1	0,6	4	1,3	4,1	4,3	5,6	5,1	6,3

cv (%)	50,1	7,8	4,2	24,2	21,5	20	15,6	34,6	20,1	9	14,7
	40 – 60 cm ⁽²⁾										
SP	11,3ns	13,5ns	5,3ns	2,2ns	17,2ns	6ns	26,1ns	21,7ns	25,5ns	51,6ns	49ns
S	12,5	13,3	5,4	2,2	18,2	6,1	24,8	17,8	26,6	51,4	51,4
S+A	11,9	13,9	5,3	2,5	18	6,5	25,8	22,2	27	52,9	50,7
Referência ⁽³⁾	28	17,2	6,2	1,9	44,7	15	17,5	-	61,7	79,2	78
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Ns
DMS	4	1,3	0,2	0,4	3,9	1,5	3,6	6,1	5,5	4,9	7
cv (%)	38,4	11,4	4,9	20,5	24,7	28,5	16,1	34	23,7	10,7	15,7
	60 – 100 ⁽²⁾ cm										
SP	6,4ns	11,8ns	5,5ns	1,8ns	15,9ns	6,5ns	23,3ns	32,4ns	24,3ns	47,7ns	50,5ns
S	7	12,4	5,6	1,8	15,5	5,9	24,6	26	23,3	47,9	49,5
S+A	7,6	12,3	5,5	1,9	17	6,9	22,3	28,9	25,9	48,2	52
Referência ⁽³⁾	25,2	13,7	6,2	1,1	26,2	12,5	17,7	-	39,9	57,5	69,2
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS	4,5	1,8	0,2	0,3	6	2,2	6,3	11,2	8,4	9,7	8,8
cv (%)	72,2	16,9	4,8	20,2	42,6	39,7	30,5	43,6	39	23	19,7

⁽¹⁾ as médias nas linhas comparam o preparo de solo na mesma profundidade; (2): profundidade de amostragem; * significativo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo a 5% de probabilidade; (3): resultados da amostragem feita na mata (não incluída na análise estatística). SP: sem preparo; S: subsolado e S+A: subsolado e arado.

O impacto dos preparos estratégicos de solo, sobre o teor de matéria orgânica no solo podem ser verificados na Tabela 7. Nota-se que após 6 meses da realização dos preparos, os teores de matéria orgânica foram reduzidos em 23% e 15%, respectivamente nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, enquanto na camada de 20-40 cm houve um aumento no tratamento subsolagem seguida de aração e gradagem. Após as plantas de cobertura no outono de 2023, houve uma recuperação do conteúdo de matéria orgânica, fazendo com que o contraste entre área em plantio direto e o preparo estratégico fosse de 7%. Nota-se também que as plantas de cobertura que proporcionaram maior quantidade de biomassa seca e contribuíram mais na elevação dos teores de matéria orgânica na camada de 0-10 cm. Quanto mais palha, maior o aumento nos teores de matéria orgânica.

Em termos de carbono total, verifica-se que antes dos preparos, o tratamento com longo histórico de cultivo de milho já apresentava teores superiores em relação às demais rotações, considerando a camada de 5-10 cm (Tabela 8). Porém, antes dos preparos não foi detectada diferença no estoque de carbono e nitrogênio nas rotações estabelecidas na área, nas outras camadas estudadas.

Tabela 8. Distribuição de carbono e nitrogênio nas camadas e estoque em função do histórico de culturas. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2022.

Camada cm ⁽¹⁾	T1	T2	T3	T4	Test F	CV %
————— Carbono no solo (Mg.ha ⁻¹) —————						
0 - 5	13,9 ^{ns}	13,5	13,9	14,8	0,8 ^{ns}	8,7
5 - 10	11,9 ^a	10,5 ^b	11,1 ^{ab}	11,4 ^{ab}	4,1 [*]	5,0
10 - 20	19,5 ^{ns}	18,5	18,9	18,0	0,6 ^{ns}	8,5
20 - 40	32,2 ^{ns}	30,9	31,9	29,8	0,32 ^{ns}	12,8
40 - 60	24,9 ^{ns}	23,2	23,7	21,9	1,7 ^{ns}	7,9
60 - 100	37,7 ^{ns}	38,3	35,5	37,2	0,4 ^{ns}	9,1
————— Estoque de carbono no solo (Mg.ha ⁻¹) —————						
0 - 100	140,3 ^{ns}	135,1	135,1	133,3	0,8 ^{ns}	4,7
————— Nitrogênio no solo (Mg.ha ⁻¹) —————						
0 - 5	1,1 ^{ns}	1,2	1,2	1,3	2,0 ^{ns}	10,7
5 - 10	1,0 ^{ns}	0,9	0,9	1,0	1,7 ^{ns}	7,5
10 - 20	1,6 ^{ns}	1,5	1,6	1,4	1,6 ^{ns}	9,2
20 - 40	2,6 ^{ns}	2,4	2,6	2,4	0,3 ^{ns}	13,5
40 - 60	1,7 ^{ns}	1,5	1,7	1,6	0,8 ^{ns}	13,0
60 - 100	2,6 ^{ns}	2,4	2,5	2,4	0,4 ^{ns}	12,2
————— Estoque de Nitrogênio no solo (Mg.ha ⁻¹) —————						
0 - 100	10,7 ^{ns}	10,1	10,6	10,3	0,5 ^{ns}	6,6

⁽¹⁾As médias nas linhas comparam os resultados na mesma profundidade; * significativo teste de Tukey (p <0,05); ns: não significativo a 5% de probabilidade. T1: milho; T2: soja; T3 girassol e T4: crotalaria.

Verifica-se na Tabela 9 os resultados de estoque de carbono (EC) e nitrogênio após os preparos de solo realizados. As operações de subsolagem seguida de aração com aiveca e gradagem, ocasionou redução significativa do carbono e nitrogênio estocados nas camadas 0-5 cm e 5-10 cm do solo, todavia, aumentando na camada de 10-20 cm. Na camada de 0-5 cm, a redução do carbono e nitrogênio foi de 35%. Vale lembrar que mais de 85% das raízes da soja estão concentradas nos primeiros 10 cm de profundidade (Bolonhezi et al., 2021). Provavelmente, essa tenha sido uma das razões pelas menores produtividades de alguns cultivares. Spargo et al. (2008) observaram que o estoque de carbono em solos com histórico de plantio direto de longo prazo frequentemente se concentra nas camadas superficiais. Essa diferença também foi verificada nos valores deste estudo. Considerando o estoque de carbono

no perfil avaliado (0,00 – 1,00 m) após 26 anos sem operações de preparo, houve uma perda significativa nas parcelas que foram submetidas ao preparo ocasional (Liu et al., 2020). Para o nitrogênio, a mesma tendência foi observada, entretanto, ao considerar o estoque de nitrogênio no perfil avaliado, não foram encontradas diferenças significativas (Obour et al., 2021).

Tabela 9. Distribuição de carbono e nitrogênio nas camadas e estoque em função do histórico de culturas e dos preparos de solo na cultura da soja. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2023.

Camada	Históricos ⁽²⁾						Preparos ⁽²⁾				
cm ⁽¹⁾	R1	R2	R3	R4	Test F	CV%	SP	S+A	S	Test F	CV%
Carbono no solo (Mg.ha ⁻¹)											
0 - 5	14,0ns	12,4	14,4	14,9	0,1 ^{ns}	18,8	16,2a	10,5b	15,0a	41.44**	13,2
5 - 10	12,0ns	11,0	11,7	11,8	0,8 ^{ns}	14,9	12,0a	11,1b	11,7ab	3,9*	8,0
10 - 20	20,1ns	18,9	19,2	19,1	0,3 ^{ns}	15,0	18,9ab	20,6a	18,5b	5,0*	10,6
20 - 40	33,4a	32,7	29,9	30,2	0,1 ^{ns}	12,1	31,2ns	31,7	31,9	0,21 ^{ns}	9,9
40 - 60	24,3ns	23,5	20,7	22,8	0,2 ^{ns}	17,0	22,8ns	21,9	23,7	1,6 ^{ns}	11,6
60 - 100	40,6ns	40,0	41,9	41,1	1,6 ^{ns}	11,9	40,7	39,6	42,4	0,8 ^{ns}	14,8
Estoque de carbono no solo (Mg.ha ⁻¹)											
0 - 100	144,6ns	138,7	138,0	140,2	0,1 ^{ns}	9,4	142,0ab	135,7b	143,4a	4,5*	5,4
Nitrogênio no solo (Mg.m ⁻³)											
0 - 5	1,2ns	1,0	1,2	1,3	0,1 ^{ns}	24,6	1,4a	0,9b	1,3a	50,4**	12,4
5 - 10	0,9ns	0,9	1,0	1,0	0,8 ^{ns}	20,6	1,0a	0,9b	1,0a	6,7**	7,7
10 - 20	1,7ns	1,6	1,7	1,6	0,5 ^{ns}	24,4	1,6ns	1,7	1,5	3,0 ^{ns}	14,3
20 - 40	2,7ns	2,9	2,5	2,4	0,5 ^{ns}	22,9	2,6ns	2,7	2,6	0,3 ^{ns}	12,7
40 - 60	1,9ns	1,8	1,6	1,7	0,2 ^{ns}	34,8	1,8ns	1,7	1,8	0,9 ^{ns}	19,8
60 - 100	3,0ns	2,9	3,0	2,9	0,1 ^{ns}	41,9	3,1ns	2,9	2,9	0,7 ^{ns}	16,9
Estoque de nitrogênio no solo (Mg.m ⁻³)											
0 - 100	11,7ns	11,3	11,2	11,1	0,1 ^{ns}	27,4	11,7ns	11,0	11,4	1,9 ^{ns}	9,2

⁽¹⁾As médias nas linhas comparam os resultados na mesma profundidade; ⁽²⁾: medias referentes ao histórico e preparos; * significativo teste de Tukey (p <0,05); ns: não significativo a 5% de probabilidade. SP: sem preparo; S: subsolado; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: trevo branco.

De acordo com trabalho de Nunes et al (2011), a taxa de conversão do carbono orgânico no plantio direto sobre palhada de mucuna é 14,3%, enquanto no sistema convencional de preparo e palhada de milho é 4,0%. Segnini et al. (2013) em pesquisa de longa duração conduzida na mesma unidade da APTA em Ribeirão

Preto/SP, encontraram valores semelhantes de estoque de carbono na camada de 0-60 cm, sendo $EC = 120 \pm 5 \text{ Mg.ha}^{-1}$ no preparo convencional e $EC = 127 \pm 4 \text{ Mg.ha}^{-1}$ no plantio direto após 7 anos, com taxas de sequestro de carbono de 1,63 e 0,67 $\text{Mg C.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, respectivamente.

4.6 Bioindicadores de qualidade do solo

A avaliação dos atributos microbiológicos do solo, nunca estiveram tão em evidência nas pesquisas sobre preparos de solo em áreas com plantio direto consolidado. Nas duas safras de condução da pesquisa foram realizadas análises da infecção de micorrizas, glomalina e carbono da biomassa microbiana. A colonização de fungos micorrízicos arbusculares serve como um indicador o efeito dos cultivos de plantas de cobertura em sistemas agrícolas. Importantes para aumentar a eficiência na absorção de fósforo, também exercem papel na proteção do sistema radicular e na tolerância aos períodos de estresse hídrico. Glomalinas são glicoproteínas produzidas pelas micorrizas e estão diretamente relacionadas com a formação dos agregados nos solos. Todavia, não foram identificadas diferenças estatísticas em nenhum dos anos, para amostras coletadas no florescimento pleno dos cultivares de soja (Figura 25).

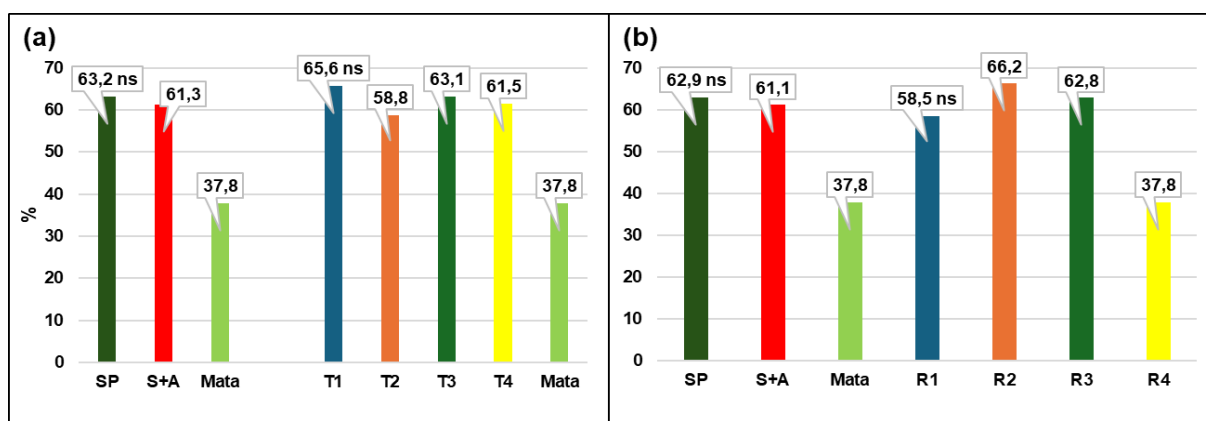


Figura 25. Colonização por fungos micorrízicos arbusculares, em função dos preparos e histórico de cultivo, avaliados nas safras 2022/23 (a) e 2023/24 (b) ns: diferença não significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). SP: sem preparo; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4: crotalária; R1: milheto + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

Por outro lado, com relação a atividade das principais enzimas do solo, foram verificadas diferenças estatísticas nos dois anos. Para a atividade da fosfatase ácida, na safra 2022/23 não foi verificada diferença estatística entre os tratamentos. Contudo, na safra 2023/24 houve diferença estatística, com valores em média 17% superior no plantio direto contínuo. O cultivo do R1 milho + aveia proporcionou aumento de 16% na fosfatase ácida em comparação com o tratamento R4 (Figura 26). Essa enzima não é considerada estável, e, portanto, não é considerada nas BioAS, de acordo com a EMBRAPA.

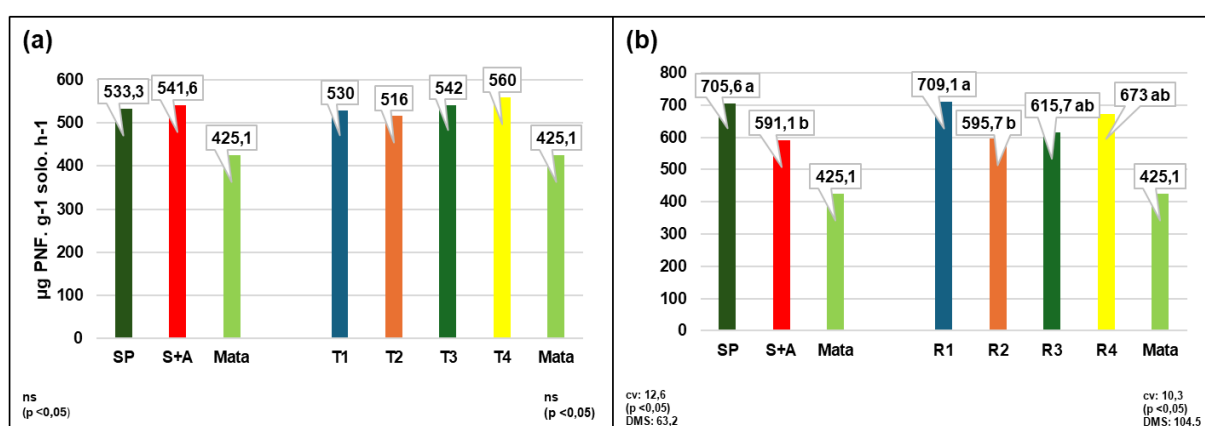


Figura 26. Atividade da enzima de solo, fosfatase ácida durante o ciclo da soja na primeira safra nos preparos do solo e histórico de rotação (a); e na segunda safra após as plantas de cobertura (b), os valores da mata de referência. as médias comparam os preparos e os históricos separadamente. Valores da mata são de referência não estão inclusos na análise estatística, ns: não significativo pelo teste de Tukey. SP: sem preparo; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4: crotalária; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

No entanto, para a atividade das enzimas beta glicosidase e arilsulfatase houve diferença estatística para as duas safras. Na safra 2022/23 verifica-se na mesma Figura 27, que o preparo S+A reduziu em 13% a atividade da enzima beta-glicosidase. Da mesma maneira, observou-se redução de 19% na atividade da enzima arilsulfatase no preparo estratégico (Figura 28). Para todos os tratamentos de opção de culturas, foi verificado aumento na safra 2023/24, em média de 19%, 20%, 31% e 31% para os tratamentos R2, R4, R3 e R1, respectivamente.

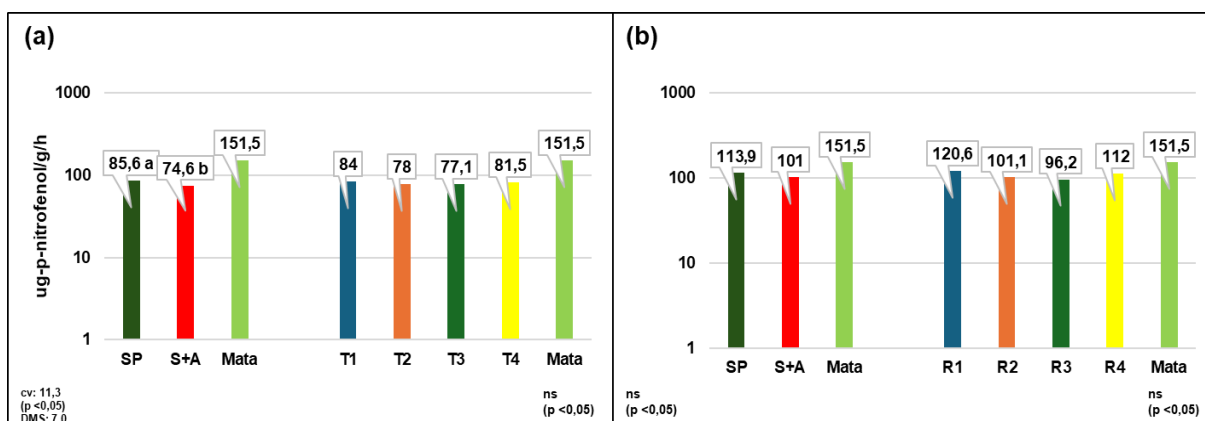


Figura 27. Atividade beta glicosidase durante o ciclo da soja na primeira safra nos preparos do solo e histórico de rotação (a); e na segunda safra após as plantas de cobertura (b), os valores da mata de referência. as médias comparam os preparos e os históricos separadamente. Valores da mata são de referência não estão inclusos na análise estatística, ns: não significativo pelo teste de Tukey. SP: sem preparo; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4: crotalária; R1: milheto + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

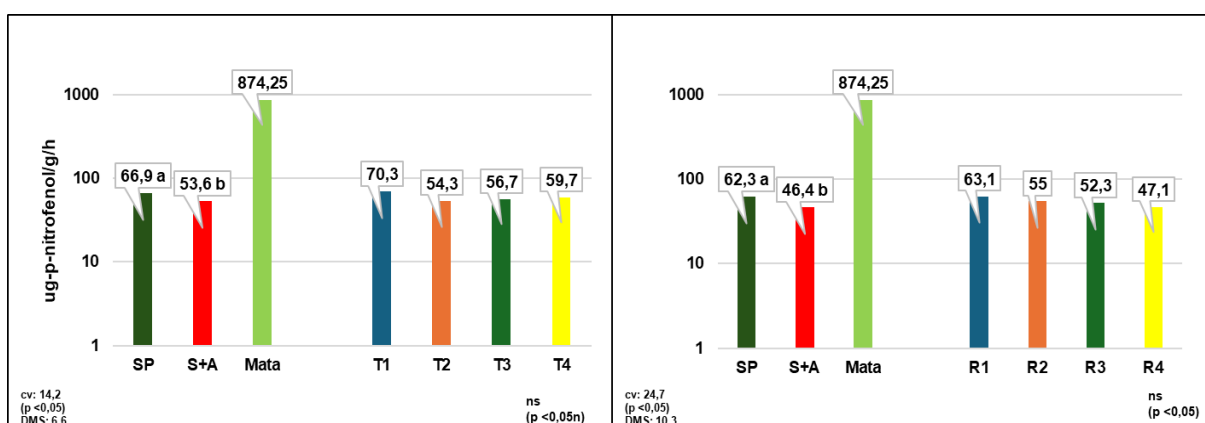


Figura 28. Atividade arilsulfatase durante o ciclo da soja na primeira safra nos preparos do solo e histórico de rotação (a); e na segunda safra após as plantas de cobertura (b), os valores da mata de referência. as médias comparam os preparos e os históricos separadamente. Valores da mata são de referência não estão inclusos na análise estatística, ns: não significativo pelo teste de Tukey. SP: sem preparo; S+A: subsolado e arado; T1: milho; T2: soja; T3 girassol; T4: crotalária; R1: milheto + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: tremoço branco.

As enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase estão relacionadas aos ciclos do carbono e do enxofre, respectivamente, e possuem vantagens importantes: alta sensibilidade, baixa variabilidade sazonal, facilidade e baixo custo de análise, além de forte correlação com os teores de carbono no solo e a produtividade das culturas

(Mendes et al., 2021; Chaer et al., 2023; Serafim et al., 2023). Segundo Mendes et al. (2022), algumas enzimas do solo são mais sensíveis aos impactos das práticas de manejo, atuando como indicadores precoces das consequências de práticas inadequadas. Chaer et al. (2023), com base em um modelo desenvolvido a partir de 1212 amostras de solo de mais de 100 áreas agrícolas no Brasil, concluíram que a atividade dessas enzimas é um sinal claro de distúrbios causados pelo manejo inadequado, apresentando reduções antes e em maior magnitude do que os teores de carbono no solo.

Atualmente, os laboratórios que seguem os critérios das BioAS da Embrapa fornecem, além dos resultados individuais das principais enzimas, um índice de qualidade do solo (IQS) e valores de referência específicos para a cultura da soja. Na Figura 29, observa-se que houve diferença estatística significativa entre o plantio direto contínuo e o preparo ocasional após 26 anos. Embora não tenha sido constatada diferença estatística entre as opções de plantas de cobertura, o índice de qualidade do solo na área estudada encontra-se, de modo geral, na faixa considerada alta (0,61–0,80), devido a manutenção prolongada do sistema de plantio direto. Entretanto, as operações de preparo, mesmo em curto prazo, resultaram em uma redução para a faixa média, o que levanta um sinal de alerta. Os valores de referência do IQS são categorizados da seguinte forma: 0,81–1,00 (muito alto), 0,61–0,80 (alto), 0,41–0,60 (médio), 0,21–0,40 (baixo) e 0,00–0,20 (muito baixo).

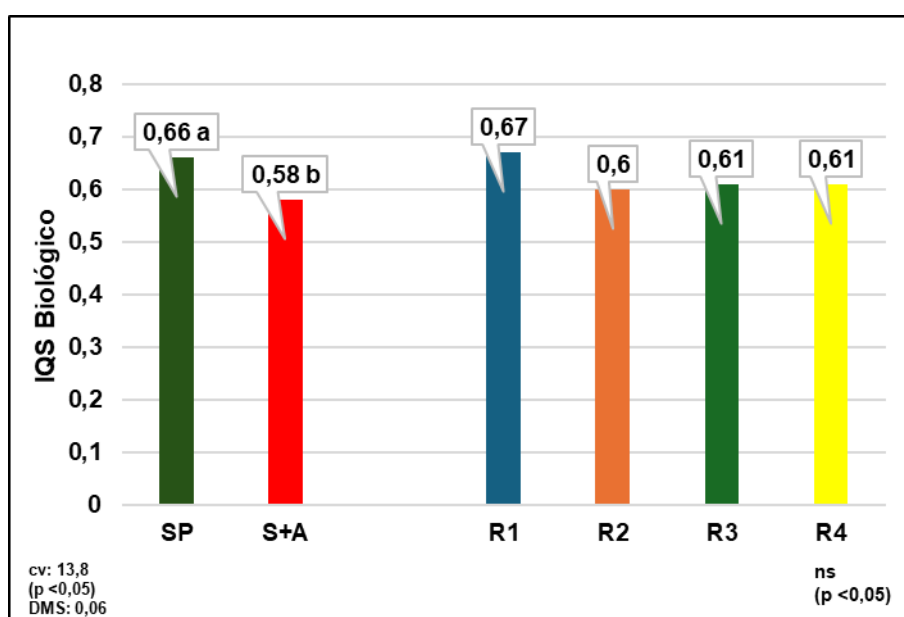


Figura 29. Índice de qualidade do solo nos preparos de solo e plantas de cobertura durante a segunda safra da soja. Ribeirão Preto, SP, 2024. as médias comparam os

preparos e as rotações separadamente, ns: não significativo pelo teste de Tukey. SP: sem preparo; S+A: subsolado e arado; R1: milho + aveia; R2: vegetação espontânea pousio; R3: mix de plantas de cobertura e R4: trevo branco.

Os resultados obtidos corroboram a base técnica que sustenta a tecnologia das bioanálises. Como explicado por Chaer et al. (2021), solos que entram em processo de degradação apresentam, inicialmente, uma redução na atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, que são sensíveis e indicam distúrbios em estágio inicial, caracterizando o solo como "em risco". Caso o distúrbio persista, o conteúdo de carbono do solo também é reduzido, indicando que o solo entrou em uma condição de "doença". Por outro lado, práticas agrícolas que favorecem a recuperação, como o uso de plantas de cobertura e a redução do preparo do solo, promovem aumentos na atividade dessas enzimas, ainda que sem um aumento proporcional nos conteúdos de carbono, classificando o solo como "em recuperação". Quando, tanto a atividade enzimática, quanto os teores de carbono são elevados, o solo é novamente considerado "saudável".

Ao analisar a correlação entre os dados, foi possível observar, na safra 22/23 (Tabela 10), que a beta-glicosidase e o carbono da biomassa se destacaram como variáveis-chave, correlacionando-se positivamente com a produtividade dos cultivares de soja (Mendes et al., 2024). Esses resultados reforçam a importância da atividade microbiológica e da qualidade do solo para o aumento da produtividade. Em relação à fosfatase ácida e à arilsulfatase, não foram observadas correlações significativas, sugerindo que, nas condições deste experimento, essas enzimas tiveram menor relevância como indicadores de saúde do solo ou de produtividade da soja.

Tabela 10. Análise de Correlação entre as Variáveis de Produtividade e Atividades Enzimáticas, safra 22-23. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2023.

Variáveis	Produtividade	Fosfatase ácida	Carbono da Biomassa	FMAS	Beta- Glicosidase	Arilsulfatase
Fosfatase ácida	0,23798 (NS)	-	-	-	-	-
(Valor-p)	(0,7620)					

Variáveis	Produtividade	Fosfatase ácida	Carbono da Biomassa	FMAS	Beta- Glicosidase	Arilsulfatase
Carbono da Biomassa	0,950317 (*)	0,37494 (NS)	-	-	-	-
(Valor-p)	(0,0497)	(0,6251)				
FMAS	0,66593 (NS)	0,22551 (NS)	0,44212 (NS)	-	-	-
(Valor-p)	(0,3341)	(0,7745)	(0,5579)			
Beta- Glicosidase	0,99668 (**)	0,19032 (NS)	0,957531 (*)	0,61171 (NS)	-	-
(Valor-p)	(0,0033)	(0,8097)	(0,0425)	(0,3883)		
Arilsulfatase	0,92833 (NS)	0,06129 (NS)	0,76668 (NS)	0,85455 (NS)	0,91133 (NS)	-
(Valor-p)	(0,0717)	(0,9387)	(0,2333)	(0,1455)	(0,0887)	

(NS) – Não significativo; (*) – Significativo a 5%; (**) – Significativo a 1% probabilidade.

Na safra 23/24, a beta-glicosidase apresentou uma correlação forte e significativa com a produtividade ($r = 0,95$, $p < 0,05$), conforme mostrado na Tabela 11, sugerindo que sua atividade está positivamente relacionada à produtividade da soja. Resultados semelhantes foram observados por Mendes et al. (2021), onde práticas de manejo afetaram positivamente os indicadores de saúde do solo, como a beta-glicosidase, correlacionando-se diretamente com a produtividade (Adetunji et al., 2017; Peixoto et al., 2019). Não foram observadas correlações significativas entre a fosfatase ácida, a glomalina e a colonização por micorrizas com a produtividade, nem entre essas variáveis, o que pode indicar que esses fatores não tiveram influência significativa sobre a produtividade nesta safra (Wortmann et al., 2010). Da mesma forma, a arilsulfatase também não apresentou correlação significativa com a produtividade ou com as demais variáveis (Blanco-Canqui; Wortmann, 2020; Dang et al., 2015).

Tabela 11. Análise de Correlação entre as Variáveis de Produtividade e Atividades Enzimáticas (Safrá 2023/2024)

Variáveis	Produtividade	Fosfatase Ácida	Glomalina	FMAS	Beta- Glicosidase	Arilsulfatase
Fosfatase Ácida	0,94338 (NS)	-	-	-	-	-
(Valor-p)	(0,0566)					
Glomalina	0,67796 (NS)	0,86310 (NS)	-	-	-	-
(Valor-p)	(0,3220)	(0,1369)				
FMAS	-0,2468 (NS)	-0,0354 (NS)	0,45840 (NS)	-	-	-
(Valor-p)	(0,7532)	(0,9646)	(0,5416)			
Beta- Glicosidase	0,950340 (*)	0,94162 (NS)	0,65364 (NS)	-0,3677 (NS)	-	-
(Valor-p)	(0,0497)	(0,0584)	(0,3464)	(0,6323)		
Arilsulfatase	0,64928 (NS)	0,36960 (NS)	0,00706 (NS)	-0,4390 (NS)	0,46000 (NS)	-
(Valor-p)	(0,3507)	(0,6304)	(0,9929)	(0,5610)	(0,5400)	

(NS) – Não significativo; (*) – Significativo a 5% de probabilidade.

Os resultados das safras 22/23 e 23/24 mostram uma consistência relevante da beta-glicosidase como fator influente na produtividade. A variação dos outros fatores indica que a beta-glicosidase é um indicador confiável de produtividade em diferentes condições de cultivo e safras, enquanto outras variáveis podem ser mais influenciadas por fatores externos, como clima, preparo do solo e rotações de culturas (Mendes et al, 2024). A beta-glicosidase destacou-se em ambas as safras como um fator determinante para a produtividade da soja, sugerindo que essa enzima pode ser um bom indicador da saúde do solo em sistemas de plantio direto de longa duração (Adetunji et al 2017). Por outro lado, a fosfatase ácida, a colonização por micorrizas e a arilsulfatase não se mostraram bons preditores de produtividade, o que pode indicar a necessidade de estudos mais específicos ou a influência de outras variáveis no desempenho dessas enzimas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na segunda safra, o cultivar BRS7380 apresentou desempenho inferior, principalmente em função da baixa qualidade fisiológica das sementes, o que comprometeu a germinação e a emergência. O crescimento inicial lento, aliado às temperaturas elevadas observadas ao longo do ciclo, resultou em drástica redução na população final de plantas.

As condições climáticas mais secas e quentes dessa safra também evidenciaram de forma mais clara os efeitos do preparo do solo sobre a cultura da soja, ao contrário da primeira safra, quando o excesso de chuvas mascarou os efeitos dos tratamentos, especialmente nas características agronômicas dos cultivares.

Os efeitos do preparo na redução da resistência mecânica do solo à penetração foram temporários, não se mantendo além de 400 dias após a realização das operações, conforme indicaram as leituras realizadas com o penetrômetro.

Na entressafra, o tremoço branco, utilizado como planta de cobertura, destacou-se pelo elevado aporte de macro e micronutrientes, especialmente nitrogênio, cuja ciclagem foi 25% superior à segunda melhor opção avaliada.

Na primeira safra, observou-se menor população de nematoides de vida livre no tratamento 4, que envolveu o cultivo anterior de crotalária. Esse resultado é atribuído à liberação de substâncias alelopáticas pela crotalária, que suprimem tanto nematoides de vida livre quanto fitopatogênicos. Por outro lado, o preparo com arado de aivecas, por promover maior revolvimento e exposição do solo, reduziu significativamente a população de nematoides fitopatogênicos. Contudo, na segunda safra, tais diferenças entre os preparos não foram observadas.

Em relação à distribuição dos nutrientes no perfil do solo, os preparos com arado e subsolador promoveram maior uniformidade, resultado também associado à incorporação da calagem e gessagem realizadas previamente às operações. Essa prática favoreceu a disponibilidade de nutrientes e melhorou as características químicas do perfil.

Contudo, observou-se perda significativa no estoque de carbono no solo, evidenciando que a incorporação da matéria orgânica superficial e o estímulo à atividade microbiana intensificaram a emissão de carbono para a atmosfera, caracterizando um impacto negativo do preparo ocasional. Esse efeito foi corroborado pela redução dos teores de matéria orgânica, do índice de qualidade do solo (IQS) e

da atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase nas parcelas submetidas ao preparo, em comparação às áreas mantidas em plantio direto contínuo.

Entre os cultivares avaliados, o N6700 apresentou desempenho superior em produtividade, mantendo estabilidade sob diferentes condições de manejo, o que reforça seu potencial para sistemas agrícolas com variabilidade edafoclimática.

6. CONCLUSÕES

Após 26 anos de plantio direto, o preparo ocasional resultou em perdas no estoque de carbono, na matéria orgânica e na atividade das enzimas beta-glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida, refletindo na redução do índice de qualidade do solo e na produtividade da soja, especialmente em condições de estresse hídrico. Embora os preparos tenham reduzido a resistência mecânica do solo à penetração, os efeitos foram temporários e não promoveram alterações nos atributos físicos do solo. O plantio direto, especialmente em consórcio com aveia e milho, proporcionou maior produtividade de grãos e reduziu significativamente a temperatura do solo em até 15,5 °C durante períodos de estiagem. A enzima beta-glicosidase destacou-se como um bioindicador eficiente da produtividade da soja.

6. REFERÊNCIAS

Adetunji AT, Lewu FB, Mulidzi R, Ncube B (2017) The biological activities of β -glucosidase enzyme as a bioindicator of soil quality and its relationship with soil properties in managed ecosystems: A review. **Journal of Soil Biology and Biochemistry** 33:1087-1095.

Asady, G. H., & Smucker, A. J. M. (1989). Compaction and root modification of soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, 53(1), 251-254.

Asmus, G. L. (s.d.). Nematóides em Sistema Plantio Direto. Embrapa Agropecuária Oeste. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24226/1/Sistema-Plantio-Direto-e-Nematoides-Guilherme-Asmus.pdf>. Acesso em: 10/02/2025.

Barbosa JCW, Maldonado Júnior. "Software AgroEstat: Sistema de análises estatísticas de ensaios agrônômicos." Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, Brasil; 2009.

Barbosa LC, de Souza ZM, Franco HCJ, Otto R, Neto JR, Garside AL, Carvalho JL. N. Soil Texture Affects Root Penetration in Oxisols under Sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 13, p. 15–25, 1 jun. 2018.

Bauke SI, Landl M, Koch M, Hofmann D, Nagel KA, Siebers, N, Schnepf A, Amelung W. Macropore effects on phosphorus acquisition by wheat roots – a rhizotron study. **Plant and Soil**, v. 82, p. 416-467, (2017).

Bengough, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

Bertola C, Oliveira W, Medeiros F (2021) Atividade microbiana e dinâmica de nutrientes em sistemas de plantio direto. **Soil Science and Plant Nutrition** 29:527-535.

Betiol, O.; Bolonhezi, D.; Leal, É. R. P.; Gruener, C. E.; Michelotto, M. D.; Furlani, C. E. A.; Ruiz, F. F. (2023). Conservation agriculture practices in a peanut cropping system: Effects on pod yield and soil penetration resistance. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 47, e0230004.

Bieluczyk W, Silva JF, Almeida RN (2020) Plantio direto e matéria orgânica no solo: contribuições para a sustentabilidade agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1087-1095.

Blanco-Canqui H, Lal R (2011a) Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal** 65:527-540.

Blanco-Canqui H, Lal R (2011b) Soil structure and organic carbon dynamics. **Journal of Soil and Tillage Research** 38:15-29.

Blanco-Canqui H, Lal R (2020) No-till and soil physical environment. **Journal of Soil and Water Conservation** 75:86-100.

Blanco-Canqui H, Lal R, Owens LB (2020) Long-term tillage impacts on soil properties and crop productivity. **Journal of Soil and Tillage Research** 45:20-35.

Bonnin JJ, Mirás-Avalos JM, Lanças KP, González AP, Vieira SR. Spatial Variability of Soil Penetration Resistance Influenced by Season of Sampling. **Bragantia**, v. 69, p. 163–173, 2010.

Camargo OA, Alleoni LR. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Degas pari; 1997.

Campbell DJ, O'sullivan MF. The Cone Penetrometer in Relation to Trafficability, Compaction and Tillage. In: Smith, K. A.; Mullins, C. E. Soil Analysis: physical methods. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 339-429.

Cantarella, H.; Quaggio, J. A.; Mattos Jr., D.; Boaretto, R. M.; Raij, B. van (ed.). Soja. In: **Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. cap. 3.6, p. 209–212.

Chaer G, Mendes IC, Reis EF, Oliveira Júnior JP (2021) Bioanálises de solos: princípios, indicadores e aplicações. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 45:e0200194.

Chaer GM, Mendes IC (2022) Plantas de cobertura como agentes de mitigação de compactação do solo e doenças. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:108-125.

Chaer, G.M.; Mendes, I.C.; Dantas, O.D.; Malaquias, J.V.; Reis Junior, F.B.; Oliveira, M.I.L. Evaluating C trend in clayey cerrado oxisol using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and beta-glucosidade activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, 104742, 2023.

Collares GL, Reinert DJ, Reichert JM, Kaiser DR. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

Dang Y, Moody P, Bell M, Seymour N, Dalal R, Freebairn D, Walker S (2015) Strategic tillage in no-till farming systems in Australia's northern grain-growing regions: II. Implications for agronomy, soil and environment. **Soil and Tillage Research** 152:115–123.

de SÁ MAC, Santos Júnior J. Considerações teóricas sobre o cálculo da resistência mecânica do solo à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos. **Embrapa Cerrados-Documents** (Infoteca-E), 2007.

Dias Junior MS. de. Compactação do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. H. V.; Schaefer, C. E. G. R. (ed). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, SBCS, 2000, v.1., p.55-88, 2000.

Embrapa (2020) Manual de bioanálises (BioAS): Metodologia e aplicações. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, DF, 100 p.

Embrapa (2021) Bioanálises de solos: Manual de aplicação e interpretação dos indicadores microbiológicos da qualidade do solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/bioas>. Acesso em: 11/11/24.

Fernandes MMH, Coelho AP, Silva MF da, Bertonha RS, Queiroz RF de, Furlani CEA, Fernandes C. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks. **Catena**. 2020;189:104505. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104505>.

Ferraz LCCB, Monteiro AR (1995) Diversidade de Nematóides em Agroecossistemas e Ecossistemas Naturais. Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/571966/1/doc191.pdf>. Acesso em: 11/12/24.

Fidalski J, Tormena CA, Costa J (2015) Ocorrência de compactação do solo em áreas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:32-45.

Garcia RA, Souza ED, Costa FS, Anghinoni I (2019) Soil compaction and crop yield response to occasional tillage of a no-till clayey soil. **Soil and Tillage Research** 187:174-182.

Gianelli, V.; Trombetta, M.; Petracco, M.; Monda, A.; Scoppettoli, M.; Fernández-Quintanilla, C. Weed seedbank changes under strategic tillage in no-till soybean-based systems in Argentina. *Field Crops Research*, v. 295, 109054, 2023.

Glinski J, Lipiec J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton : CRC Press., 1990. 247 p.

Grandy AS, Loecke TD, Parr S, Robertson GP (2006) Conservation practices and their effects on soil quality and agricultural productivity. **Agronomy Journal** 46:45-60.

Guedes Filho, O., Grego, C. R., Vieira, S. R., & Souza, Z. M. (2010). Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34(3), 617-630.

Gupta SC, Sharma PP, Defranchi SA. Compaction effects on soil structure. **Advances in Agronomy**, v.42, p.311-338, 1989.

Hillel D. Soil compaction and consolidation. In: **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 355-385.

Hillel D. Soil dynamics: stress, strain, and strength. In: **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. p. 341-379.

Johnson GA, Lee DJ (2020) Impact of tillage and crop rotation on weed populations and herbicide resistance management. **Weed Science** 68(2):123-134.

Kuhwald M, Hamer WB, Brunotte J, Duttman R. Soil Penetration Resistance after One-Time Inversion Tillage: A Spatio-Temporal Analysis at the Field Scale. **Land**. 2020;9:482. <https://doi.org/10.3390/land9120482> .

Lewis DB, Kaye JP, Fraterrigo JM (2018) Soil carbon and nitrogen responses to plant management in no-tillage systems. *Soil Use and Management* 24:18-30.

Lipiec J, Stepniewski W. Effect of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. **Soil & Tillage Research**, v. 35, p. 37-52, 1995.

Liu, C., Lu, M., Cui, J., Li, B., & Fang, C. (2014). Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 20(5), 1366-1381.

Lopez, R.; Kostka, S. J.; Sparks, D. L. Strategic tillage of no-till soil reduces dissolved phosphorus loss via surface and subsurface flow. **Journal of Environmental Quality**, v. 53, p. 27–37, 2024.

Martinez AG, Kumar S (2021) Short-term impact of occasional tillage on soil microbial communities in long-term no-till systems. *Applied Soil Ecology* 163:103929.

Martínez E, Fuentes JP, Silva P (2016) Stratification of soil chemical properties and its influence on crop yield under no-tillage systems. *Soil Use and Management* 32:27-35.

Martínez I, Johnson G, Cambardella C, Baribaut P (2016) Soil organic matter stratification as an indicator of tillage effects on soil quality. **Soil Science Society of America Journal** 80:1357-1367.

Martíni AF, Valani GP, Silva LFSD, Bolonhezi D, Prima SD, Cooper M. Long-Term Trial of Tillage Systems for Sugarcane: Effect on Topsoil Hydrophysical Attributes. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3448, jan. 2021.

Masle J. High soil strength: Mechanical forcer at play on root morphogenesis and in root/shoot signaling. In: *Plant Roots: The Hidden Half*. Waisel, Yoav; Eshel, Amram; Kafkafi, Uzi, (Eds.). CRC Press, Taylor & Francis Group. 807-820 p., 2002.

Mendes IC, Chaer GM, Lima RP (2021) Beta-glicosidase como bioindicador de qualidade do solo em sistemas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1087-1095.

Mendes IC, Chaer GM, Moreira FMS (2024) Bioindicators of soil health in sustainable agricultural systems. **Journal of Soil Science** 35:45-58.

Mendes IC, Reis EF, Oliveira Júnior JP, Figueiredo CC (2022) Enzimas do solo como bioindicadores da qualidade edáfica em sistemas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 46:e0210173.

Mills, J. J.; Gross, J. R.; Kasprzak, R. J.; Hilinski, T. E.; Shanahan, P. E. Limited impacts of strategic tillage on dry aggregate distribution and C and N fractions in a semi-arid soil under conservation agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 230, 105445, 2023.

Moraes MT de, Debiasi H, Franchini JC, Silva VR da. Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. **Engenharia Agrícola**. 2013;33:748-57. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400014>.

Moraes, M. T. et al. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 1, p. 288–298, 2014

Neher DA (2020) Nematodes as bioindicators of soil health. *Annual Review of Phytopathology* 58:453-470.

Nunes, R. De S.; Lopes, A.A.; Martinhão, D.G.S.; Mendes, I.De C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de cerrado coma sucessão soja-milho. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p. 1497-1419, 2011.

Obour PB, Feng G, Singh K (2017) Tillage systems and their influence on soil quality and water conservation. **Soil and Tillage Research** 41:22-38.

Obour PB, Ugarte CA. meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil & Tillage Research**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>.

Peixoto DS, da Silva ÁV, de Araújo ASF, Ferreira TO, de Medeiros EV (2019) Soil quality responses to long-term no-tillage and conventional tillage in the Brazilian semi-arid region. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65:155-166.

Peixoto DS, Tavares RL, Oliveira MV (2019) Impacto do manejo no conteúdo de carbono e compactação em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:55-62.

Pierce FJ, Burkett B (1994) Transitory impacts of occasional tillage in no-till systems. **Soil Science and Tillage Research** 21:45-59.

Segnini A, Carvalho JLN, Bolonhezi D, Milori DMBP, Silva WTLD, Simões ML, ... 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.

Serafim ME, Mendes IC, Wu J, Ono FB, Zancanaro L, Valendorff JDP, Zeviani WM, Pierangeli MAP, Fan M, Lal R (2023) Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till systems in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment* 862:160674.

Shierlaw J, Alston AM. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, v. 77, p. 15-28, 1984.

Silva RF, Oliveira AC, Gomes RT (2019) Effects of cover crops on soil nematodes and organic matter. **Journal of Soil Biology** 36:45-52.

Siqueira-Neto M, Vitorino ACT, Fernandes Neto Júnior DD, Fernandes AM, Serafim ME (2009) Compactação de um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com crescimento radicular e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:917-930.

Spargo JT, Cavigelli MA, Mirsky SB, Maul JE, Meisinger JJ (2008) Mineralizable soil nitrogen and labile soil organic matter in diverse long-term cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82:197–205.

Stolf R (1991) Manual de utilização do penetrômetro de impacto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 15:229-235.

Unger PW, Kaspar TC. Soil compaction and root growth: A Review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

Vaz CMP, Bassoi LH, Hopmans JW (2013) Multivariate analysis of soil physical properties of a Brazilian Oxisol to assess soil compaction impact. **Soil and Tillage Research** 129:123-131.

Wortmann CS (2020) Conservation tillage impacts on soil health and crop productivity: A global review. *Agricultural Systems* 183:102874.

Wortmann CS, Mamo M, Shapiro CA, Tarkalson DD, Dobermann A (2010) No-till and conventional tillage effects on maize nitrogen response in dryland environments. **Soil and Tillage Research** 106(2):138-145.

Gianelli, V.; Trombetta, M.; Petracco, M.; Monda, A.; Scoppettoli, M.; Fernández-Quintanilla, C. Weed seedbank changes under strategic tillage in no-till soybean-based systems in Argentina. *Field Crops Research*, v. 295, 109054, 2023.

Mills, J. J.; Gross, J. R.; Kasprzak, R. J.; Hilinski, T. E.; Shanahan, P. E. Limited impacts of strategic tillage on dry aggregate distribution and C and N fractions in a semi-arid soil under conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*, v. 230, 105445, 2023.

Lopez, R.; Kostka, S. J.; Sparks, D. L. Strategic tillage of no-till soil reduces dissolved phosphorus loss via surface and subsurface flow. *Journal of Environmental Quality*, v. 53, p. 27–37, 2024.