

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO CONSUMO
DE COMBUSTÍVEL E NA EMISSÃO DE CO₂

Rafael Henrique de Souza Silva

Jaboticabal - SP

2º SEMESTRE/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO CONSUMO
DE COMBUSTÍVEL E NA EMISSÃO DE CO₂

Rafael Henrique de Souza Silva

Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

Co-orientador: Lucas Eduardo Zonfrilli

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

2° SEMESTRE/2025

S586s Silva, Rafael Henrique de Souza

Sistemas de preparo do solo e sua influência no consumo de combustível e na emissão de CO₂ / Rafael Henrique de Souza Silva. -- Jaboticabal, 2025

52 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rouverson Pereira da Silva

Coorientador: Lucas Eduardo Zonfrilli

1. Emissão de CO₂. 2. Mobilização do solo. 3. Consumo de combustível. 4. Fluxômetro. 5. Controle estatístico de processo (CEP). I. Título.

RAFAEL HENRIQUE DE SOUZA SILVA

**SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL E NA EMISSÃO DE CO₂**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônoma.

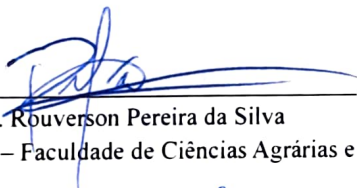
Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva
Coorientador: Lucas Eduardo Zonfrilli

Área de Concentração: Máquinas e Mecanização Agrícola

Data da defesa: 19/11/2025

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:

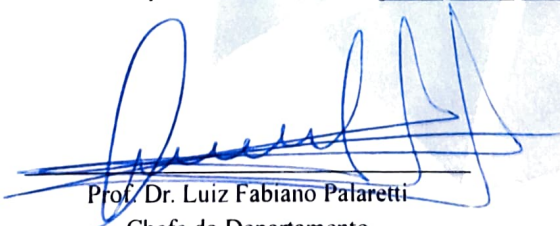

Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal


Eng. Agrônomo Me. Thiago Caio Moura Oliveira
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal


Eng. Agrônoma Erika Cristina Gomes Sales
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

25 / 11 / 2025


Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico esta defesa a minha família e amigos. A todos que acreditaram em mim, me incentivaram e estiveram ao meu lado durante toda a minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder saúde, pela proteção constante, por me guiar e fortalecer em todos os momentos.

Aos meus pais Maria de Lurdes de Souza Silva e Pedro Henrique da Silva e ao meu irmão Samuel Henrique de Souza Silva, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos ensinamentos que me moldaram como pessoa. Agradeço pela paciência, pela compreensão e pelo exemplo de dedicação e esforço que sempre me inspiraram.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva pela amizade, paciência e incentivo, sempre acreditando na minha capacidade. Sou grato pelas orientações, pela confiança e pela disponibilidade em me auxiliar em todos os momentos desta jornada.

Ao meu coorientador Lucas Eduardo Zonfrilli, pela amizade, atenção, pelas conversas, pelo incentivo e apoio fundamental à realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio financeiro para desenvolvimento desta pesquisa – 2024/20311-5.

Agradeço a todos os integrantes do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) e Rouverson Silva Research Group (RSRG) pelo companheirismo, incentivo e colaboração.

Ao Prof. Dr. Newton La Scala Junior por ter concedido equipamento LICOR LI-8100, utilizado nas medições do fluxo de CO₂ do solo e por todo apoio técnico para a realização dos ensaios.

Agradeço aos meus amigos Rafael Cavichioli Lopes e Murilo Augusto Destefani que compartilharam comigo esta jornada da graduação, pelo apoio, incentivo e colaboração em todos os momentos.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Câmpus de Jaboticabal, pelas oportunidades de aprendizado e desenvolvimento acadêmico.

A todos que contribuíram de forma direta e indiretamente, o meu muito obrigado e os meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1 Emissão de CO ₂ do solo.....	12
2.2 Preparo do solo	13
2.3 Mobilização do solo.....	15
2.4 Consumo de combustível	16
2.5 Pneus Radiais	17
2.6 Controle Estatístico de Processos (CEP)	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Campo de Estudos	19
3.2 Especificações do trator utilizado, rodados e patinagem.....	21
3.3 Implementos e preparo do solo	23
3.4 Emissão de CO ₂ do solo.....	24
3.5 Consumo de combustível e emissão de CO ₂ pelo trator	26
3.6 Perfil do solo	28
3.7 Amostragem e compactação do solo.....	29
3.8 Análise estatística.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 Caracterização física do solo.....	32
4.2 Consumo de combustível e emissão de CO ₂ pelo trator	37
4.3 Emissão de CO ₂ do solo.....	40
5. CONCLUSÃO	48

RESUMO

A busca por maior sustentabilidade na agricultura tem intensificado os estudos sobre os impactos ambientais das práticas de manejo, em especial o armazenamento e a emissão de CO₂ pelo solo. A mecanização agrícola exerce papel central nesse processo, visto que distintos sistemas de preparo influenciam a conservação do solo e refletem em diferentes níveis de emissões de CO₂, bem como na combustão do óleo diesel. O objetivo deste trabalho foi avaliar as emissões de CO₂ do solo e da combustão de óleo diesel de um trator agrícola em três sistemas de preparo. O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da FCAV/UNESP, em Jaboticabal–SP, utilizando trator Valtra A73F 4x2 TDA de 58 kW. Os sistemas de preparo avaliados foram: (i) preparo convencional, composto por duas gradagens e um nivelamento; (ii) preparo reduzido com escarificador; e (iii) preparo reduzido com enxada rotativa. As emissões de CO₂ do solo foram mensuradas com sistema LI-COR LI-8100, enquanto a emissão de CO₂ pelo trator foi avaliada através da correlação com o consumo de combustível mensurado por um fluxômetro. Os resultados indicam que a enxada rotativa promoveu a maior desagregação do solo, o preparo convencional apresentou o maior consumo de combustível e emissão de CO₂, e o preparo reduzido com escarificador apresentou maior capacidade de mitigar emissões e conservar as características originais do solo, destacando-se como a opção mais conservacionista

Palavras-chave: Emissão de CO₂; Mobilização do solo; Consumo de combustível; Fluxômetro; Controle estatístico de processo (CEP)

ABSTRACT

The pursuit of greater sustainability in agriculture has intensified research on the environmental impacts of management practices, particularly soil CO₂ storage and emissions. Agricultural mechanization plays a central role in this process, as different tillage systems affect soil conservation and result in distinct CO₂ emission levels, as well as diesel fuel combustion. This study aimed to evaluate soil CO₂ emissions and CO₂ from diesel combustion of an agricultural tractor under three tillage systems. The experiment was conducted at the Teaching, Research, and Extension Farm of FCAV/UNESP, in Jaboticabal, São Paulo, using a Valtra A73F 4×2 FWD tractor rated at 58 kW. The soil tillage systems assessed were: (i) conventional tillage (two disk harrow passes plus leveling); (ii) reduced tillage with a chisel plow; and (iii) reduced tillage with a rotary hoe. Soil CO₂ fluxes were measured with a LI-COR LI-8100 system, while tractor CO₂ emissions were inferred from fuel consumption measured with a flowmeter. The results indicate that the rotary hoe promoted the greatest soil disaggregation, conventional tillage led to the highest fuel consumption and CO₂ emissions, and reduced tillage showed a greater capacity to mitigate emissions and preserve the soil's original attributes, standing out as the most conservation-oriented option.

Keywords: CO₂ emission; Soil mobilization; Fuel consumption; Flowmeter; Statistical process control (SPC)

1. INTRODUÇÃO

A busca por maior sustentabilidade na agricultura tem intensificado os estudos sobre os impactos ambientais das práticas de manejo, em especial o armazenamento e a emissão de CO₂ pelo solo. A mecanização agrícola exerce papel central nesse processo, visto que distintos sistemas de preparo influenciam a conservação do solo e refletem em diferentes níveis de emissões de CO₂, bem como na combustão do óleo diesel (Hou et al., 2022).

A crescente preocupação com a sustentabilidade na agricultura tem levado à análise detalhada dos impactos ambientais das práticas agrícolas, especialmente no que diz respeito ao armazenamento de CO₂ no solo e a emissão na atmosfera. A mecanização agrícola é um dos principais fatores que afetam essas emissões, pois os diferentes tipos de preparo do solo influenciam a preservação do solo, assim como o consumo de combustível, resultando em maiores ou menores emissões de carbono (Iamaguti et al., 2015).

O preparo de solo envolve práticas que melhoram as condições físicas do solo e impactam significativamente o meio ambiente. Essas operações liberam CO₂ do solo para a atmosfera e demandam alto consumo de combustível, fatores que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa. Logo, é importante adotar técnicas de manejo que otimizem a eficiência agrônômica e minimizem os impactos ambientais.

Objetivou-se neste projeto estudar a emissão de CO₂ do solo referente a três sistemas de preparo do solo, bem como a emissão de CO₂ oriunda do combustível consumido nestas operações. Os objetivos específicos são:

- a) Criar um conjunto de dados com informações de consumo de combustível de um trator agrícola em operações de preparo de solo;
- b) Avaliar a redução da emissão do CO₂ do solo devido à utilização de preparos reduzidos;
- c) Avaliar o potencial de redução do consumo de combustível nos diferentes sistemas de preparo;
- d) Avaliar a mobilização do solo nos diferentes sistemas de preparo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Emissão de CO₂ do solo

Segundo Iamaguti et al. (2015), o preparo do solo influencia diretamente o fluxo de CO₂ (FCO₂) em canaviais em reforma, pois a mobilização altera o microambiente térmico-hídrico e expõe agregados, intensificando a respiração do solo. No estudo conduzido, os autores compararam três sistemas: preparo convencional (PC), subsolagem convencional (SC) e subsolagem localizada (SL), monitorando FCO₂, temperatura e umidade do solo por 17 dias após as operações, em delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas no tempo e 45 pontos amostrais (colares de PVC).

Os autores relatam que o PC apresentou as maiores emissões de CO₂, associadas a solo mais exposto, maior temperatura e menor umidade, enquanto a SL reduziu significativamente as emissões ao limitar o volume mobilizado e preservar umidade na linha de plantio. Como síntese, Iamaguti et al. (2015) concluem que a conversão do preparo convencional para subsolagem localizada diminui a contribuição do preparo do solo para as emissões de gases de efeito

estufa, recomendando abordagens mais conservacionistas em reformas de canaviais.

De forma semelhante, Dadalto et al. (2015) avaliaram a influência de diferentes sistemas de preparo mecanizado do solo sobre a atividade microbiológica e a emissão de CO₂, comparando plantio direto (PD), plantio convencional (PC) e cultivo mínimo (CM), em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, e amostragens em três momentos (antes, após e 14 dias depois do preparo). Foram determinados o carbono orgânico total, carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo, quociente metabólico e quociente microbiano. Os resultados mostraram que o plantio direto apresentou maiores valores de CBM e RBS, refletindo maior acúmulo e estabilidade de carbono na camada superficial e menor perturbação microbiológica, enquanto o plantio convencional promoveu maior liberação de CO₂ pela oxidação da matéria orgânica e pela ruptura dos agregados, evidenciando que sistemas conservacionistas reduzem as perdas de carbono e emissões de CO₂, contribuindo para a sustentabilidade do manejo do solo.

2.2 Preparo do solo

O preparo reduzido emprega menos operações e menor intensidade de mobilização em comparação ao preparo convencional, o que contribui para manter mais resíduos na superfície, favorecer o acúmulo de carbono orgânico e melhorar a estabilidade de agregados e a infiltração de água, ainda que possa elevar ligeiramente a densidade na camada superficial. Em contraste, o preparo convencional com aração e gradagens sucessivas rompe os agregados, acelera

a decomposição da matéria orgânica e reduz a cobertura do solo, resultando em menor infiltração, maior escoamento superficial, maior suscetibilidade à erosão e formação de camadas compactadas logo abaixo da profundidade trabalhada (Betiol et al., 2023).

Carvalho Filho et al. (2007) avaliaram os efeitos de sistemas de preparo periódico do solo sobre a degradação estrutural e a incorporação de resíduos no município de Uberaba, MG, durante um ano agrícola, em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, comparando escarificador, enxada rotativa, arado de aivecas, grade aradora e arado de discos por meio da distribuição percentual de agregados, diâmetro médio geométrico, módulo de finura e incorporação de resíduos; concluíram que enxada rotativa e grade aradora foram mais agressivos à estrutura, escarificador e enxada rotativa apresentaram menor capacidade de incorporação de resíduos, e o escarificador se destacou por manter maior cobertura vegetal e maior grau de agregação do solo.

Conforme Ormond et al. (2018) que investigaram os efeitos do preparo do solo sobre a qualidade do arranquio e da recolhedora na cultura do amendoim no Brasil, comparando preparo convencional e conservacionista (com revolvimento restrito à linha de semeadura), por meio de técnicas de Controle Estatístico de Processo (CEP) aplicadas às perdas visíveis e invisíveis; avaliaram as perdas no arranquio e na recolhedora em duas preparações e, na recolhedora, testaram três velocidades de deslocamento (4, 6 e 8 km h⁻¹); constataram que o preparo do solo afetou a qualidade do processo, com melhor qualidade de arranquio no sistema conservacionista, enquanto a recolhedora em

preparo convencional apresentou menor variabilidade e melhor qualidade operacional em todas as velocidades, ao passo que o conservacionista mostrou instabilidade nos indicadores.

2.3 Mobilização do solo

Conforme descrito por Carvalho Filho et al. (2007) que relacionaram métodos de preparo do solo à rugosidade superficial em Latossolo Vermelho distrófico de Uberaba-MG, em delineamento em blocos casualizados com cinco preparos (escarificador, enxada rotativa, arado de aivecas, grade aradora e arado de discos) e quatro repetições, quantificando área mobilizada e de elevação (referidas à superfície natural pré-mobilização), empolamento, espessura média da camada mobilizada, índice de rugosidade e sua modificação (antes/depois); concluíram que o escarificador gerou menor empolamento e maior índice de rugosidade, caracterizando preparo conservacionista por desestruturar menos o solo e potencialmente reduzir perdas por erosão.

Outro estudo conduzido por Stolf et al. (2014) descreveram o penetrômetro de impacto (dinâmico) em contraste ao penetrômetro estático, destacando que, enquanto o estático mede a resistência do solo pela força reativa durante a inserção contínua de uma haste cônica, o dinâmico a estima pela queda livre de uma massa acoplada à mesma haste, fundamentando-se na dinâmica newtoniana; desenvolveram uma ferramenta computacional em VBA/Excel para processar rapidamente dados do penetrômetro de impacto, estruturada em planilhas que geram tabelas e gráficos científicos, equalizam a profundidade em camadas constantes por interpolação, unificam até 40 perfis em uma única tabela com médias e gráficos, e permitem selecionar perfis por

posição (linha/entrelinha); concluíram que a abordagem agiliza a padronização e a análise da resistência do solo, oferecendo saída direta em formato científico e suporte à comparabilidade entre perfis em estudos de compactação e manejo do solo.

2.4 Consumo de combustível

Como observado por Corrêa Júnior et al. (2024) que desenvolveram um sistema embarcado para monitorar em tempo real o consumo de combustível e a patinagem de tratores agrícolas, com o objetivo de aumentar a eficiência operacional e reduzir impactos ambientais. O estudo foi conduzido com quatro velocidades e duas condições de terreno, utilizando plataformas de prototipagem e validação em campo, e comparando três métodos de determinação da patinagem. Os resultados mostraram que o consumo de combustível e a patinagem variam conforme o tipo de superfície do solo e a velocidade de operação, sendo que o preparo convencional aumentou em 6% a demanda de combustível e em 17% a patinagem em comparação ao plantio direto. O sistema proposto apresentou desempenho semelhante aos métodos convencionais, possibilitando a visualização em tempo real dos dados via aplicativo Android, o que contribui para ajustes operacionais mais precisos e menor gasto energético.

Adicionalmente, Zimmermann et al. (2022) observou o consumo de combustível e o desempenho energético-operacional de tratores agrícolas equipados com rodas traseiras do tipo Single radial versus Dual diagonal durante gradagem intermediária, em delineamento em blocos casualizados com quatro velocidades-alvo (4, 6, 8 e 10 km h⁻¹) e quatro repetições; monitoraram patinagem, rotação do motor, consumo horário e específico de combustível,

força, potência e eficiência na barra de tração, velocidade operacional e eficiência térmica do motor, submetendo os dados à ANOVA, com Tukey e regressões quando significativos; concluíram que as rodas Single radiais proporcionaram maior velocidade e força na barra sem elevar o consumo de combustível, resultando em ganhos de desempenho energético e operacional na gradagem, e oferecendo subsídios objetivos para decisões de troca ou rearranjo do rodado visando economia de combustível.

2.5 Pneus Radiais

Conforme evidenciado por Monteiro et al. (2011) que compararam o desempenho de um trator com pneus radiais versus diagonais sob três condições superficiais (superfície firme, solo preparado e cobertura de restos de milho), testado em três lastragens líquidas (0%, 40% e 75% de água) e três velocidades teóricas (4, 5 e 7 km h⁻¹; marchas B1, B2 e C1), avaliando velocidade de deslocamento, patinagem, consumo horário e específico de combustível, potência e rendimento na barra de tração; concluíram que, embora os pneus diagonais maximizem o desempenho com 75% de lastragem, os pneus radiais apresentam melhor desempenho com 40% de água, proporcionando maior velocidade e menor patinagem, reduções de consumo (horário e específico) e maior potência e rendimento na barra de tração, evidenciando a vantagem operacional dos radiais quando corretamente calibrados e lastreados.

Em continuidade, Aleixo et al. (2025) analisaram o efeito do tipo de pneu, sobre o desempenho operacional de tratores 4×2 TDA em São José da Bela Vista/SP e nas áreas experimentais da FCAV/UNESP (Jaboticabal/SP), durante ensaios de preparo de solo e pulverização, comparando pneus diagonais novos,

recauchutados e pneus radiais (pneus-esteiras), com pressões ajustadas ao índice de carga e monitoramento de avanço/relação cinemática, patinagem, consumo de combustível, raio de giro e área de contato; concluíram que pneus radiais, quando corretamente calibrados e lastreados, tendem a reduzir a patinagem e o consumo (horário e específico), aumentar a velocidade efetiva e a potência/rendimento na barra de tração, como também apresentam os menores consumos e patinagens, porém maior raio de giro e área de contato, e que valores de avanço cinemático próximos de 1,50 - 1,60% são desejáveis, ao passo que avanços >5% (observados com diagonais) indicam desajuste.

2.6 Controle Estatístico de Processos (CEP)

As cartas de controle constituem a principal ferramenta do controle estatístico de processo, permitindo distinguir variações aleatórias de causas especiais ao longo do tempo. Elas representam graficamente uma estatística do processo (por exemplo, média, amplitude ou proporção de não conformes) em função da sequência de amostras. Quando os pontos permanecem dentro desses limites e apresentam um comportamento aleatório, o processo é considerado sob controle estatístico; por outro lado, pontos fora dos limites ou padrões sistemáticos (tendências, ciclos, serrilhados) sinalizam a presença de causas especiais de variação, orientando a investigação e a tomada de decisão para correção do processo (Montgomery, 2020).

Brito Filho et al. (2023) avaliaram a qualidade da colheita mecanizada de amendoim em três preparos de solo: convencional, enxada rotativa e enxada, em campo no Brasil (21°20'23" S; 47°54'06" W), usando CEP (estatística descritiva, gráficos de execução, cartas de controle e diagrama de Ishikawa) com

indicadores coletados no tanque graneleiro; concluíram que o processo foi estável para vagens inteiras, quebradas e abertas, enquanto outros indicadores saíram de controle, e que o CEP permitiu identificar causas de variabilidade e priorizar melhorias para aumentar a qualidade da colheita em função do preparo do solo.

De modo complementar, Silva et al. (2013) avaliaram a qualidade da colheita mecanizada do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) em preparo convencional e plantio direto, em experimento de campo, aplicando ferramentas de Controle Estatístico de Processo (CEP): estatística descritiva, testes de normalidade e cartas de controle sobre nível de ruído, desempenho operacional (consumo de combustível, patinagem, velocidade via datalogger) e parâmetros da operação (perdas de colheita, matéria seca e densidade de palhada); constataram que velocidade e consumos horário e operacional apresentaram distribuição normal, o ruído foi assimétrico, e perdas e densidade de palhada exibiram baixa variabilidade e normalidade, de modo que apenas o consumo horário e a produção de matéria seca da palhada mostraram instabilidade nas cartas de controle, enquanto os demais indicadores permaneceram sob controle, mantendo a qualidade da colheita tanto no preparo convencional quanto no plantio direto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Campo de Estudos

O experimento foi conduzido no município de Jaboticabal, SP, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Faculdade de Ciências Agrárias e

Veterinárias (FCAV/UNESP), localizada às coordenadas $21^{\circ}14'22,78''\text{S}$ e $48^{\circ}17'02,49''\text{O}$, a 580 m de altitude (Figura 1). A área experimental totalizou 0,70 ha, sendo demarcada em parcelas para a aplicação dos tratamentos e a realização das medições. O local apresentava uma quantidade considerável de cobertura vegetal; antes do início do experimento foi realizada uma roçagem, permanecendo grande parte do material vegetal sobre o solo. Por meio de análise realizada, determinou-se que o solo apresenta textura argilosa.

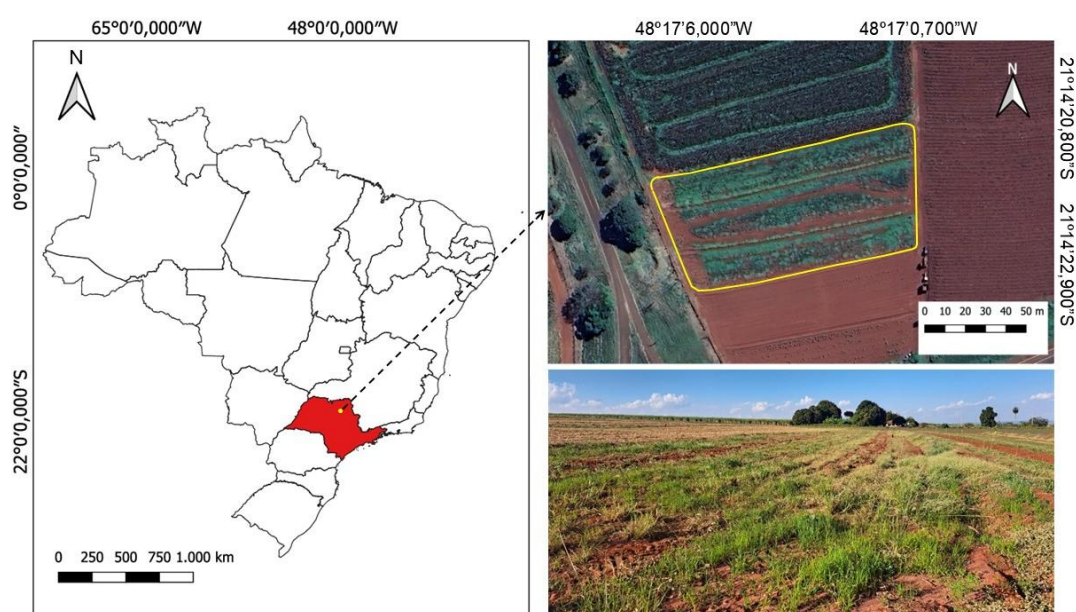


Figura 1. Mapa de localização e aspecto da área experimental.

O delineamento experimental (Figura 2) seguiu as premissas do Controle Estatístico de Processos, com amostras coletadas sequencialmente ao longo do tempo, abrangendo três tratamentos e 15 repetições por tratamento, sendo cada repetição uma parcela de 10 metros (total de 45 pontos amostrais). Os tratamentos de preparo consistiram em: (i) preparo convencional, composto por duas gradagens seguidas de nivelamento; (ii) preparo reduzido com escarificador e rolo destorroador; e (iii) preparo reduzido com enxada rotativa.

Adicionalmente, foram avaliadas quatro parcelas referentes ao tratamento não mobilizado, as quais correspondem a repetições onde não houve preparo e foram utilizadas como testemunha.

Preparo Reduzido								
1	2	3	4	5	6			
15	14	13	12	11	10	9	8	7
Não mobilizado								
	1		2		3		4	
Preparo Convencional								
1	2	3	4	5	6			
15	14	13	12	11	10	9	8	7
Enxada rotativa								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	14	13	12	11	10			

Figura 2. Representação esquemática do delineamento experimental mostrando as parcelas e tratamentos.

Esse arranjo experimental permitiu avaliar, ao longo do tempo, os efeitos dos distintos sistemas de mobilização do solo sobre as variáveis físico-ambientais de interesse.

3.2 Especificações do trator utilizado, rodados e patinagem

Foi utilizado um trator 4x2 TDA da marca Valtra, modelo A 73 F (Figura 3a), com a potência do motor de 58,1 kW (79 cv). Trata-se de um modelo compacto e sua configuração favorece manobrabilidade, baixa compactação relativa, e o acoplamento de implementos, atendendo a demandas de preparo leve e manejo de cobertura.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Trator Valtra A73F; (b) Pneu Radial tipo esteira, PneuTrac® (Trelleborg).

Foram utilizados pneus radiais da fabricante Trelleborg Pneutrac® (Figura 3b), classificação R1W e do tipo tubeless, sendo o dianteiro na dimensão VF 280/70R18 116 A8 e o traseiro na dimensão VF 480/65R28 148 A8.

O PneuTrac® é um tipo de pneu agrícola que combina características de pneus radiais com propriedades semelhantes às de esteiras. Seu design incorpora a tecnologia CupWheel e o formato lateral em “Ω” (Omega), que aumentam a área de contato mesmo sob baixa pressão, reduzindo a compactação do solo (Trelleborg, 2024).

A patinagem foi calculada pela razão entre o tempo sem operação e o tempo total de operação, de acordo com a equação 1:

$$\text{Patinagem} = 1 - \frac{\text{tempo sem operação}}{\text{tempo em operação}} \quad (1)$$

Essa relação indica a proporção de perda de deslocamento devido ao escorregamento das rodas. Quanto maior for o tempo sem operação em relação ao tempo total, maior será a patinagem e, conseqüentemente, menor a eficiência de tração.

3.3 Implementos e preparo do solo

Para o preparo convencional, utilizou-se uma grade leve (Figura 4a) composta por 36 discos, com espaçamento de 20 cm entre discos, diâmetro de discos de 50 cm e massa de 600 kg, dividindo-se em três passadas do implemento (1º gradagem, 2º gradagem e nivelamento).

No preparo reduzido com escarificador, empregou-se um escarificador com rolo destorreador (Figura 4b) composto por 5 hastes, passando apenas uma vez pelas parcelas. O escarificador apresentava ponteiros sem asa com largura de 8 cm e massa de 401 kg.

Para o preparo reduzido com enxada rotativa, utilizou-se uma enxada rotativa (Figura 4c) equipada com 6 conjuntos (flanges), cada um portando 4 facas e massa de 400 kg, realizando-se apenas uma passada sobre a área. Este preparo será referido apenas como enxada rotativa, a fim de diferenciá-lo do preparo reduzido realizado com escarificador.

Nos três tratamentos o trator estava na marcha L2 reduzida a 2000 RPM, com velocidade média de 2,5 km h⁻¹.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Implementos utilizados no preparo do solo; (a) Grade; (b) Escarificador com rolo destorroador; (c) Enxada Rotativa

3.4 Emissão de CO₂ do solo

A emissão de CO₂ do solo foi medida com o sistema portátil LI-8100 (LI-COR Biosciences, Nebraska, EUA) (Figura 5) acoplado a uma câmara de solo de circuito fechado, com volume interno de 854,2 cm³ e área de contato de 83,7 cm². Em cada ponto amostral, anéis de PVC foram previamente inseridos no solo a 3 cm de profundidade, assegurando vedação adequada e minimizando perturbações durante as leituras. O fluxo de CO₂ (FCO₂) foi estimado a partir da taxa de variação da concentração no interior da câmara, obtida por analisador de gases infravermelho (IRGA - Infrared Gas Analyzer) baseado em espectroscopia de absorção no infravermelho. Cada medição teve duração de 90 s, com aquisição de dados a cada 2,5 s, permitindo a construção de séries temporais suficientemente densas para o ajuste do gradiente temporal e o cálculo do fluxo.



Figura 5. LI-COR LI-8100.

Como variáveis de apoio, a umidade do solo (U_{solo}) foi determinada por refletometria no domínio do tempo (TDR; Hydrosense™, Campbell Scientific, Austrália) (Figura 6a) na camada de 0 - 20 cm, enquanto a temperatura do solo (T_{solo}) foi aferida com termômetro digital tipo espeto (Figura 6b) na camada de 0 - 15 cm, imediatamente adjacente aos pontos de fluxo. Esses parâmetros edáficos foram registrados de forma concomitante às leituras de CO_2 , de modo a caracterizar as condições microambientais e subsidiar a interpretação dos resultados de emissão.



(a)



(b)

Figura 6. Equipamentos; (a) TDR; (b) Termômetro digital.

A Tabela 1 apresenta as datas em que foram realizadas as medições de emissão de CO₂, ocorridas entre 15/02/2025 e 25/02/2025, bem como a representação de cada data nas cartas de controle. Conforme as recomendações da LI-COR Biosciences (2025), as medições devem ser realizadas após 24 horas de qualquer perturbação do solo, como o preparo ou a instalação dos anéis de PVC. Em razão disso, não houve medição em 16/02/2025, uma vez que o preparo do solo foi concluído na tarde do dia anterior. Além disso, no dia 20/02/2025 as medições foram suspensas devido à ocorrência de chuva.

As coletas tiveram início por volta das 5h da manhã, com duração média de duas horas. A sequência de medições seguiu a seguinte ordem: preparo convencional, não mobilizado, preparo reduzido e, por último, enxada rotativa.

Tabela 1. Datas das medições de emissão CO₂.

Data	Dia	Representação
15/02/2025	Dia 1	AP1
16/02/2025	Dia 2	Sem medição
17/02/2025		DAP1
18/02/2025	Dia 3	DAP2
19/02/2025	Dia 4	DAP3
20/02/2025	Dia 5	Sem medição
21/02/2025		DAP4
22/02/2025	Dia 6	DAP5
23/02/2025	Dia 7	DAP6
24/02/2025	Dia 8	DAP7
25/02/2025	Dia 9	DAP8

3.5 Consumo de combustível e emissão de CO₂ pelo trator

O consumo de combustível do trator foi realizado por meio de um sistema de medição volumétrica com fluxômetro de precisão, acoplado ao circuito de alimentação de diesel (Figura 7a). O fluxômetro é constituído por dois medidores de vazão, sendo que um medidor foi instalado na linha de alimentação da bomba

injetora do motor e o outro medidor na linha de retorno, que chega até o tanque de combustível. Os valores obtidos foram inseridos em uma planilha do software Excel (Microsoft®, 2022), onde foi realizada a subtração do combustível que entrou na bomba injetora e retornou ao tanque de combustível resultou no consumo real volumétrico de combustível pelo trator.

O sistema de medição do consumo de combustível foi integrado a um Arduino Mega 2560 (Figura 7b), que desempenhou a função de unidade central de aquisição e processamento de dados do fluxômetro. O microcontrolador foi responsável por receber os sinais elétricos emitidos pelos sensores de fluxo instalados nas linhas de ida e retorno do diesel, realizar a conversão desses pulsos em valores volumétricos e armazenar ou transmitir as informações para análise posterior.

O Oval M-III Model LSF41L (Figura 7c), fabricado pela OVAL Corporation, é um medidor de vazão do tipo engrenagem oval (oval gear), amplamente empregado para medições precisas de combustíveis, como o diesel, em sistemas de baixa vazão. Seu princípio de funcionamento baseia-se na rotação de duas engrenagens ovas dentro de uma câmara calibrada; cada rotação desloca um volume fixo de fluido, e o movimento é detectado por um sensor magnético que converte essas rotações em pulsos elétricos.

No modelo LSF41L, cada pulso corresponde a 1 mL de combustível, permitindo que a relação entre o número de pulsos e o volume total escoado seja direta e linear. Assim, ao integrar o sensor a um sistema de aquisição, como um Arduino Mega 2560, torna-se possível calcular o consumo instantâneo e acumulado de combustível a partir da contagem de pulsos.

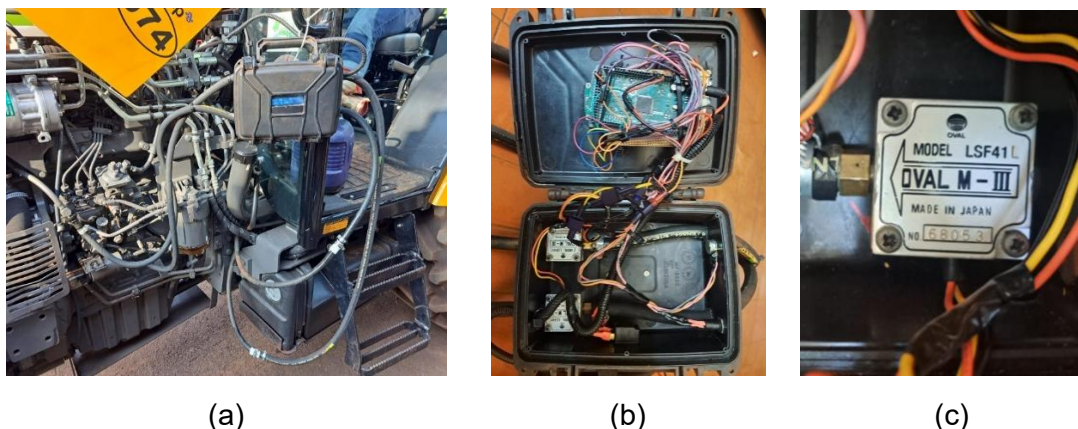


Figura 7. Fluxômetro (a) Fluxômetro acoplado ao trator; (b) Arduino Mega 2560; (c) Sensor Oval M-III Model LSF41L.

3.6 Perfil do solo

Para a obtenção dos dados de perfil de solo foi utilizado um perfilômetro mecânico (Figura 8) desenvolvido para caracterização física da superfície após operações de preparo. O equipamento empregado possui 1,20 m de largura útil e é composto por 40 hastes metálicas móveis, dispostas de forma equidistante, que se ajustam ao relevo do solo, permitindo a reprodução do microperfil formado após a passagem de implementos agrícolas. Esse perfilômetro possibilita a avaliação do grau de desagregação, rugosidade e uniformidade do solo, parâmetros fundamentais para análise da qualidade do preparo e para a interpretação de práticas de manejo.

A estrutura do perfilômetro permite o posicionamento direto no campo, sendo transportado manualmente até cada parcela e apoiada sobre o solo para registro do perfil. As hastes, ao se ajustarem à forma e a profundidade das irregularidades do terreno, fornecem uma representação do perfil do solo que pode ser fotografada e transferida para planilhas para permitir a leitura. Foram avaliados o perfil natural, correspondente à condição anterior ao preparo do solo, e os perfis superficial e de fundo, obtidos após o preparo.



Figura 8. Perfilômetro.

3.7 Amostragem e compactação do solo

A coleta foi realizada com trado holandês na camada de 0 - 20 cm. Para cada tratamento, obtiveram-se 15 amostras simples (uma por parcela). Em seguida, as 15 amostras de cada tratamento foram homogeneizadas para constituir uma amostra composta por tratamento, totalizando três amostras compostas, que foram encaminhadas a laboratório de análises de solo para determinação da textura.

A determinação da compactação do solo foi realizada com o uso do penetrômetro de impacto (Figura 9), contabilizando-se o número de impactos necessários para cada intervalo de 5 cm de profundidade. As leituras foram efetuadas desde a superfície do solo (0 cm) até 40 cm de profundidade, totalizando 8 camadas avaliadas. Em cada intervalo, registrou-se o número de golpes aplicados para que a haste penetrasse os 5 cm correspondentes, permitindo a obtenção de um perfil de resistência mecânica ao longo do perfil do solo. Esse procedimento possibilita identificar camadas compactadas e estimar a variação da resistência à penetração em função da profundidade, fornecendo subsídios para a avaliação do efeito do preparo do solo.

A compactação foi avaliada em dois momentos: 1 dia antes do preparo e 20 dias após a intervenção, com o objetivo de quantificar o efeito do preparo sobre o comportamento mecânico do solo



Figura 9. Penetrômetro de impacto.

As equações (2, 3) para cálculo da resistência em razão da penetração por impacto foram desenvolvidas em Stolf (1991a) e rerepresentada em Stolf et al. (1998; 2005):

$$\text{Unidade prática: } N (\text{Impactos/dm}) = 10 \times n^{\circ} \text{ de impactos/penetração(cm)} \quad (2)$$

$$\text{Unidade técnica: } R (\text{MPa}) = 0,56 + 0,689 \times N (\text{impactos/dm}) \quad (3)$$

3.8 Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de estatística descritiva, e posteriormente ao Controle Estatístico de Processo (CEP), com uso das Cartas de Controle de valores individuais. As cartas de controle são gráficos que ilustram a variação dos resultados, com amostras coletadas ao longo do tempo e espaço.

As cartas de controle apresentam uma linha central, que representa a média dos valores e duas linhas acima e abaixo da linha central, representando o Limite Superior de Controle (LSC) e o Limite Inferior de Controle (LIC), respectivamente. Estes limites são calculados por meio das equações 4 e 5:

$$LSC = \mu + L \cdot \sigma \quad (4)$$

$$LIC = \mu - L \cdot \sigma \quad (5)$$

Em que:

LSC: limite superior de controle;

LIC: limite inferior de controle;

μ : média dos valores individuais;

L : largura da faixa entre a média e os limites de controle;

σ : desvio-padrão.

Para a construção dos gráficos, foi utilizado o software estatístico Minitab 17®, essencial para garantir a precisão dos cálculos, fornecendo uma análise detalhada e visualmente clara dos resultados, permitindo a identificação de possíveis causas de variação nos processos analisados. As cartas de controle de valores individuais serão calculadas e elaboradas utilizando-se da largura da faixa entre a média e os limites de controle (múltiplos do desvio padrão), com o valor 3σ .

Quando os valores se mantêm dentro dos limites superior e inferior de controle, o processo é considerado estável, indicando que está sujeito apenas às variações naturais do sistema. No entanto, quando um ou mais pontos

ultrapassam esses limites, o processo é classificado como instável ou fora de controle, sugerindo a presença de causas especiais. Essas causas podem ser identificadas e classificadas com base nos fatores conhecidos como 6 M's: Máquina, Mão de obra, Material, Método, Medição e Meio ambiente, conforme descrito por Trindade et al. (2007).

O teste de Tukey foi utilizado após a análise de variância para comparar as médias das variáveis avaliadas entre os tratamentos, permitindo identificar de forma controlada quais combinações diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

Já o coeficiente de correlação de Pearson foi empregado para quantificar a intensidade e a direção da relação linear entre as emissões de CO₂ do solo e as variáveis ambientais temperatura e umidade, com valores variando de -1 a +1, indicando correlações negativas ou positivas fortes, moderadas ou fracas. A partir desse coeficiente, foi possível avaliar se aumentos de temperatura e de teor de água do solo estavam associados ao fluxo de CO₂.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física do solo

A análise física do solo apresentada na Tabela 2 mostra que todos os tratamentos avaliados, preparo reduzido, preparo convencional e enxada rotativa, apresentaram textura argilosa, determinada por meio do triângulo textural (Figura 10) a partir dos teores de argila, silte e areia. Os valores de argila variaram entre 50% e 57%, classificando todos os solos como argilosos. Observa-se que o tratamento com enxada rotativa apresentou o maior teor de

argila (57%) e o menor de areia (38%), indicando uma estrutura mais densa e possivelmente maior capacidade de retenção de água. Já o preparo convencional apresentou menor teor de argila (50%) e maior de silte (8%), o que pode favorecer ligeiramente a aeração do solo. O preparo reduzido apresentou valores intermediários entre os demais. Essas variações sutis na granulometria refletem pequenas diferenças nas condições físicas do solo, que podem influenciar processos como infiltração, armazenamento de água e emissão de CO₂.

Tabela 2. Análise física do solo.

Tratamentos	Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação
Reduzido	0 - 20	54	4	42	Argiloso
Convencional	0 - 20	50	8	43	Argiloso
Enxada	0 - 20	57	5	38	Argiloso

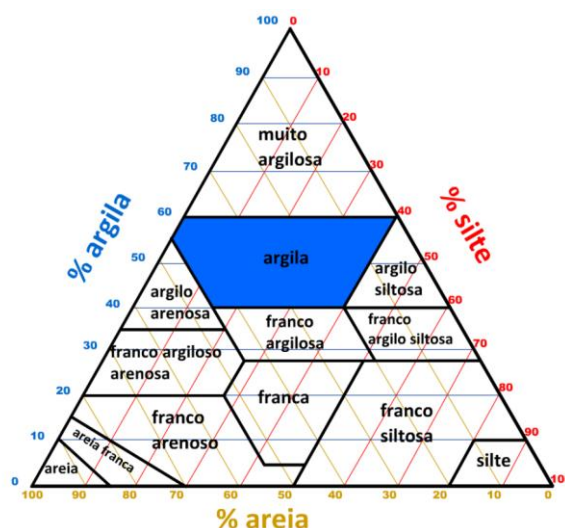


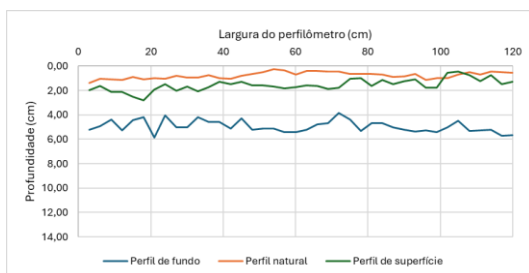
Figura 10. Triângulo textural (Quoos, 2025).

Ao analisar a Figura 11, observa-se a comparação dos perfis do solo antes e após a mobilização. A Figura 11a, correspondente ao preparo convencional, apresenta perfis bem definidos; entretanto, a operação de gradagem atingiu

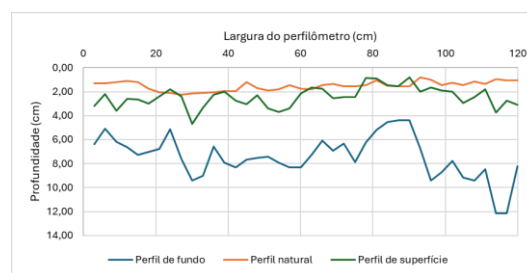
profundidade média de apenas 4,95 cm, conforme indicado na Tabela 3. Esse valor pode estar relacionado às regulagens do implemento, caracterizando esse sistema como o preparo menos profundo entre os avaliados.

A Figura 11b, referente ao preparo reduzido, demonstra maior mobilização do solo e maior irregularidade entre os três perfis, resultado associado à formação de grandes torrões após o preparo. O perfil de fundo apresentou profundidade de 7,45 cm, indicando uma atuação mais intensa sobre as camadas do solo.

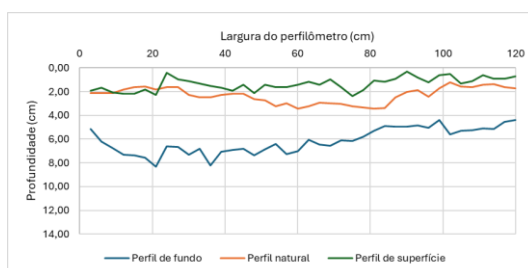
Por sua vez, a Figura 11c, que representa o preparo com enxada rotativa, apresentou valores intermediários de profundidade. Esse foi o único tratamento em que o perfil de superfície se mostrou mais elevado que o perfil natural, sugerindo maior empolamento do solo, de acordo com os mesmos resultados obtidos por Carvalho filho et al. (2007).



(a)



(b)



(c)

Figura 11. Gráficos para perfil do solo; (a) Preparo Convencional; (b) Preparo Reduzido; (c) Enxada Rotativa

Tabela 3. Profundidade média dos perfis de solo em função do tratamento.

Tratamentos	Profundidades (cm)		
	Perfil de fundo	Perfil natural	Perfil de superfície
Preparo Convencional	4,95	0,76	1,56
Preparo Reduzido	7,45	1,52	2,44
Enxada Rotativa	6,17	2,29	1,36

Com base na tabela 4, o preparo reduzido promoveu a intervenção mais intensa no perfil, combinando maior área mobilizada e maior espessura da camada trabalhada com rugosidades final e de fundo superiores às demais modalidades; na prática, esse padrão sugere maior potencial de descompactação e de retenção hídrica superficial, além de maior resistência ao escoamento e à formação de selamento, sendo indicado quando o objetivo é melhorar a estrutura do solo e a estabilidade do leito de semeadura.

A enxada rotativa, por sua vez, apresentou os maiores valores de empolamento e área de elevação, bem como elevada rugosidade inicial, mas terminou com rugosidade final baixa e mínima modificação ao longo do processo, o que indica efeito de “acabamento/alisamento” da superfície; esse comportamento é compatível com situações em que se busca um leito mais homogêneo para deposição de sementes e regularidade de plantio, ainda que com menor contribuição para a rugosidade pós-operação e para a ação estrutural em profundidade.

Já o preparo convencional mostrou mobilização e profundidade semelhantes às da enxada rotativa, mas com expressivo aumento de rugosidade entre o início e o fim da operação, configurando alternativa intermediária que eleva a macro-rugosidade superficial sem alcançar o nível de intervenção estrutural do preparo reduzido.

Tabela 4. Indicadores de mobilização e rugosidade do solo

Variável	Preparo Convencional	Preparo Reduzido	Enxada Rotativa
Área de elevação (m ²)	0,004 c	0,007 b	0,011 a
Área mobilizada (m ²)	0,050 b	0,081 a	0,050 b
Empolamento (%)	9,06 b	9,17 b	24,83 a
Espessura média da camada mobilizada (m)	0,04 b	0,07 a	0,04 b
Índice de rugosidade inicial	3,15 b	4,90 a	5,90 a
Índice de rugosidade final	6,11 b	9,05 a	5,86 b
Índice de rugosidade de fundo	5,81 b	15,97 a	6,55 b
Modificação da rugosidade	105,82 a	110,13 a	12,08 b

Com base nos gráficos apresentados na Figura 12, que mostram a Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP) antes (a) e depois (b) do preparo do solo, é possível destacar as seguintes conclusões, com ênfase na camada de 0 a 10 cm, onde houve maior ação dos implementos:

Antes do preparo (Figura 12a), observa-se que os três sistemas, preparo convencional, preparo reduzido e enxada rotativa, apresentavam valores de resistência relativamente próximos na camada superficial, variando entre 1,5 e 2,5 MPa, o que indica uma condição inicial de compactação semelhante entre os tratamentos.

Após o preparo (Figura 12b), nota-se uma redução expressiva da resistência do solo na camada de 0 a 10 cm para todos os sistemas, evidenciando a eficiência das operações de mobilização. Entre os tratamentos, o preparo com enxada rotativa apresentou os menores valores de resistência, atingindo valores próximos a 0,6 MPa nessa camada, o que indica maior desagregação e revolvimento do solo. O preparo reduzido também proporcionou uma redução significativa da resistência, embora em menor intensidade que a

enxada rotativa. Já o preparo convencional apresentou uma redução moderada, mantendo valores intermediários de RMSP.

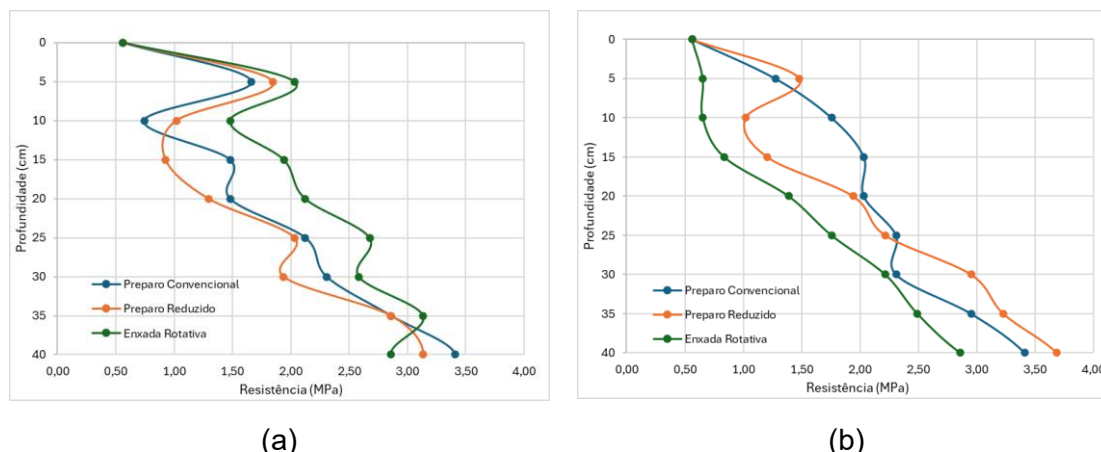


Figura 12. Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP); (a) Antes do preparo do solo; (b) Depois do preparo do solo.

4.2 Consumo de combustível e emissão de CO₂ pelo trator

As médias de patinagem obtidas a partir das medições realizadas nas 15 parcelas de cada tratamento foram de 15% para a 1ª gradagem, 2ª gradagem e nivelamento; 13% para o preparo reduzido; e 4% para a operação com enxada rotativa. Na Figura 13, observa-se o intervalo percentual considerado ideal para patinagem em pneus radiais, que varia de 5% a 12%. Nas três operações do preparo convencional (primeira gradagem, segunda gradagem e nivelamento) e no preparo reduzido, as médias de patinagem ficaram acima do intervalo ideal, com valores de 15% e 13%, respectivamente. Esse comportamento indica excesso de escorregamento, o que acarreta perda de tração efetiva, maior consumo de combustível e acelerado desgaste dos pneus, conforme observado por Neto et al. (2020). Por outro lado, a operação com enxada rotativa apresentou patinagem média de 4%, valor inferior ao recomendado, o que

sugere baixa transferência de potência ao solo, resultando em menor aderência, redução da capacidade de tração e eficiência operacional limitada.

Condições do solo	Porcentagem						
	05	07	08	10	12	15	20
Firme/Resto de cultura							
Revolvido/Trabalhado							
Solto/Arenoso							
Com Pneu Radial							
Com Pneu Diagonal							

Figura 13. Patinagem ideal (Fonte: Boletim de orientação técnica Goodyear).

A Figura 14 apresenta as cartas de controle referentes ao consumo de combustível do trator, cujas médias e limites de controle estão detalhados na Tabela 5. Nas três operações de preparo do solo, os processos mostraram-se estáveis, não sendo observados pontos fora dos limites de controle. O preparo reduzido apresentou o maior consumo de combustível, com média de 15,65 L h⁻¹, seguido pela enxada rotativa (12 L h⁻¹) e pelo preparo convencional, que apresentou o menor consumo por passada do implemento, variando de 7,36 a 9,14 L h⁻¹.

No preparo convencional, observou-se maior estabilização do processo ao longo das passadas, da primeira gradagem ao nivelamento, evidenciada pela redução dos limites de controle. Embora o preparo convencional tenha apresentado menores valores de consumo por passada individual, o fato de ser composto por três operações distintas resultou em um consumo total acumulado de 24,37 L h⁻¹.

Verificou-se, ainda, que o consumo de combustível esteve diretamente relacionado à profundidade de mobilização do solo (Tabela 3), sendo que as

operações mais profundas demandaram maior gasto de combustível por passada.

A enxada rotativa mobiliza um grande volume de solo, em profundidade e de forma muito intensa, e qualquer pequena mudança na textura, umidade ou profundidade de trabalho faz o esforço de tração “oscilar” bastante. Isso gera picos e quedas de carga no motor, refletindo em maior variação instantânea do consumo de combustível na carta de controle. Já nas gradagens e no nivelamento, o solo já está parcialmente mobilizado e mais homogêneo, a exigência de tração é mais estável e, por isso, o consumo de combustível se mantém com menor variabilidade em torno da média.

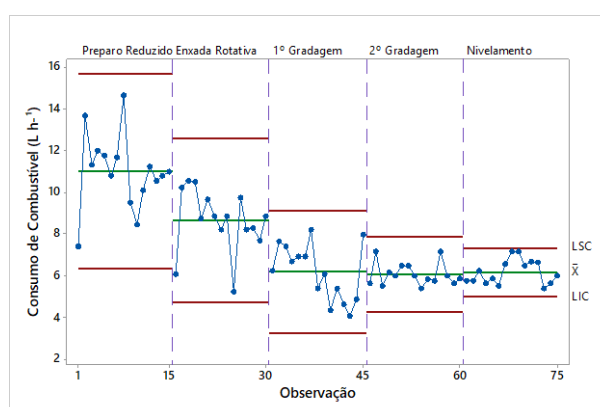


Figura 14. Cartas de controle individuais para consumo de combustível do trator.

Tabela 5. Médias e limites de controle para o consumo de combustível.

Tratamentos	Consumo de Combustível (L h ⁻¹)		
	LSC	$\bar{X}$	LIC
Preparo Reduzido	15,65	11,01	6,36
Enxada Rotativa	12,61	8,66	4,72
1º Gradagem	9,14	6,20	3,26
2º Gradagem	7,87	6,09	4,30
Nivelamento	7,36	6,18	5,00

De acordo com Santoro e Kripka (2016), para cada litro de diesel consumido são emitidos aproximadamente 2,6 kg de CO₂. Com base nesse fator de emissão, observa-se na Figura 15 que o preparo reduzido apresentou uma

emissão estimada de 28,6 kg de CO₂ por hora, seguido pela enxada rotativa, com 22,5 kg de CO₂ por hora, e pelo preparo convencional, que totalizou 63,4 kg de CO₂ por hora.

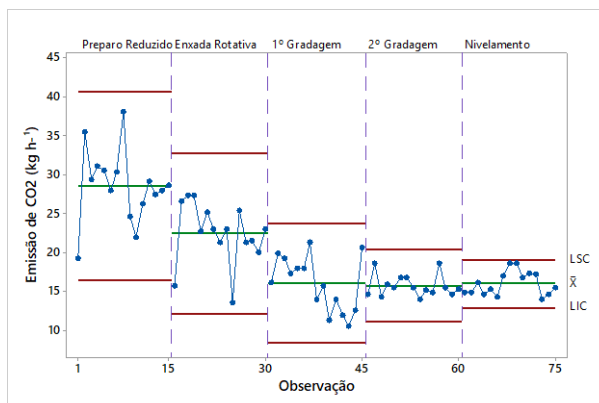


Figura 15. Cartas de controle individuais para emissão de CO₂ pelo trator.

4.3 Emissão de CO₂ do solo

A Figura 16 apresenta as cartas de controle da temperatura do solo (T_{solo}), obtidas concomitantemente às medições de emissão de CO₂. Nos três sistemas de preparo observou-se tendência de aumento da temperatura ao longo dos dias, com as menores médias registradas no primeiro dia (AP1) anterior ao preparo, próximas de 25 °C, e as maiores no último dia (DAP8), em torno de 30 °C.

Na Figura 16a, referente ao preparo convencional, foram identificados três pontos abaixo do limite inferior de controle, possivelmente associados a variações ambientais. No preparo reduzido (Figura 16b), todos os pontos permaneceram dentro dos limites de controle, caracterizando-o como o único processo com comportamento térmico estável.

Para a enxada rotativa (Figura 16c), observaram-se cinco pontos abaixo do limite inferior e cinco acima do limite superior de controle. Essa instabilidade

pode estar relacionada ao momento de execução das medições, uma vez que a coleta de temperatura deve ocorrer simultaneamente à medição da emissão de CO_2 . Durante o ponto de observação 10, a LI-COR apresentou falha de bateria, interrompendo as medições e permitindo apenas sua retomada no ponto 11, algumas horas depois. A partir de DAP1, o equipamento teve a bateria substituída, garantindo continuidade das medições subsequentes.

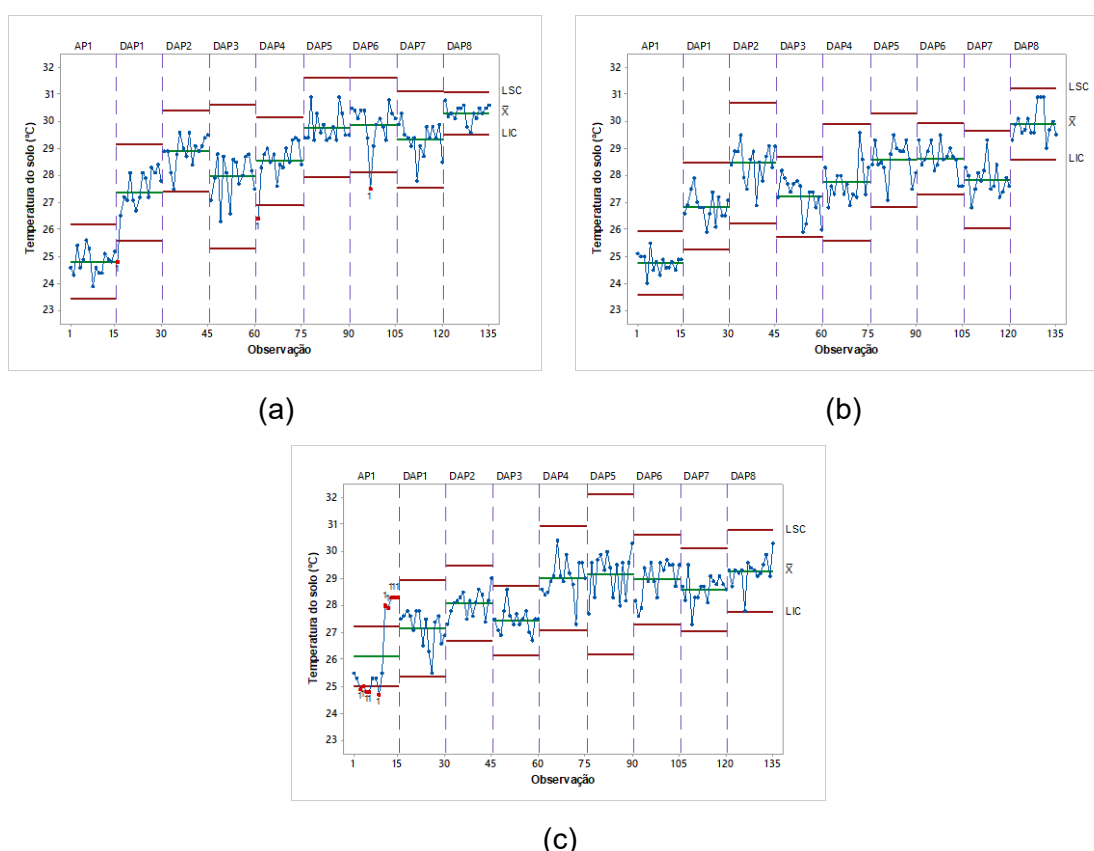


Figura 16. Cartas de controle individuais para temperatura do solo (T_{solo}); (a) Preparo Convencional; (b) Preparo Reduzido; (c) Enxada Rotativa.

A Figura 17 apresenta as cartas de controle da umidade do solo (U_{solo}). Entre as variáveis analisadas: umidade, temperatura e emissão de CO_2 , a umidade foi a que demonstrou maior instabilidade do processo, evidenciada pela grande amplitude entre os limites de controle.

Na Figura 17a, observou-se baixa variação entre as médias de umidade ao longo dos dias. Entretanto, nas Figuras 17b (preparo reduzido) e 17c (enxada rotativa), verificou-se uma queda acentuada na umidade do solo após o preparo, indicando que ambos os sistemas favoreceram a perda de água.

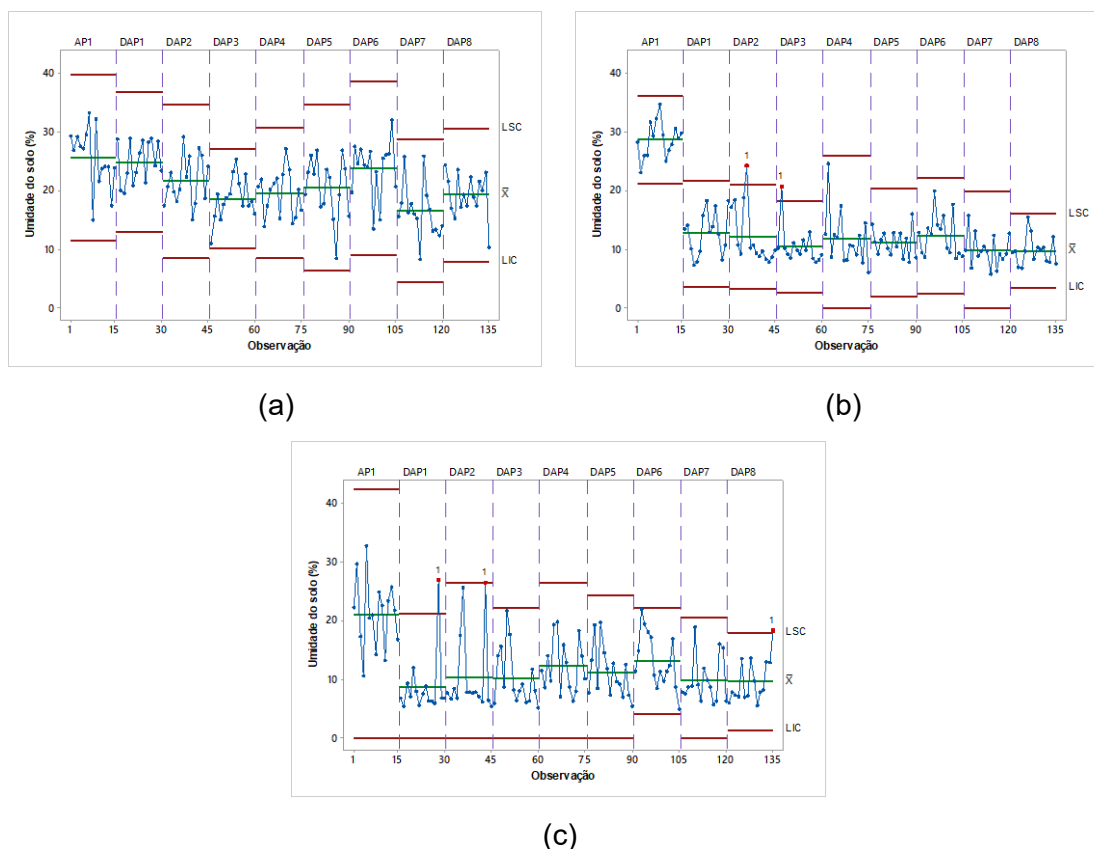


Figura 17. Cartas de controle individuais para umidade do solo (U_{solo}); (a) Preparo Convencional; (b) Preparo Reduzido; (c) Enxada Rotativa.

A Figura 18 apresenta as cartas de controle individuais para a emissão de CO₂ do solo. Nos três sistemas de preparo, observa-se que, antes da mobilização, os valores de emissão exibiram elevada variabilidade, evidenciada pelas amplas distâncias entre os limites de controle. Esse comportamento indica que as condições iniciais do solo apresentavam heterogeneidade significativa entre os pontos avaliados.

Em todos os tratamentos, nota-se uma tendência de estabilização ao longo do tempo, refletida na redução da amplitude entre os limites de controle após os primeiros dias de avaliação. Destaca-se que o preparo reduzido (Figura 18b) foi o único em que nenhum ponto ultrapassou os limites de controle, caracterizando-o como o tratamento com processo mais estável quanto à emissão de CO_2 .

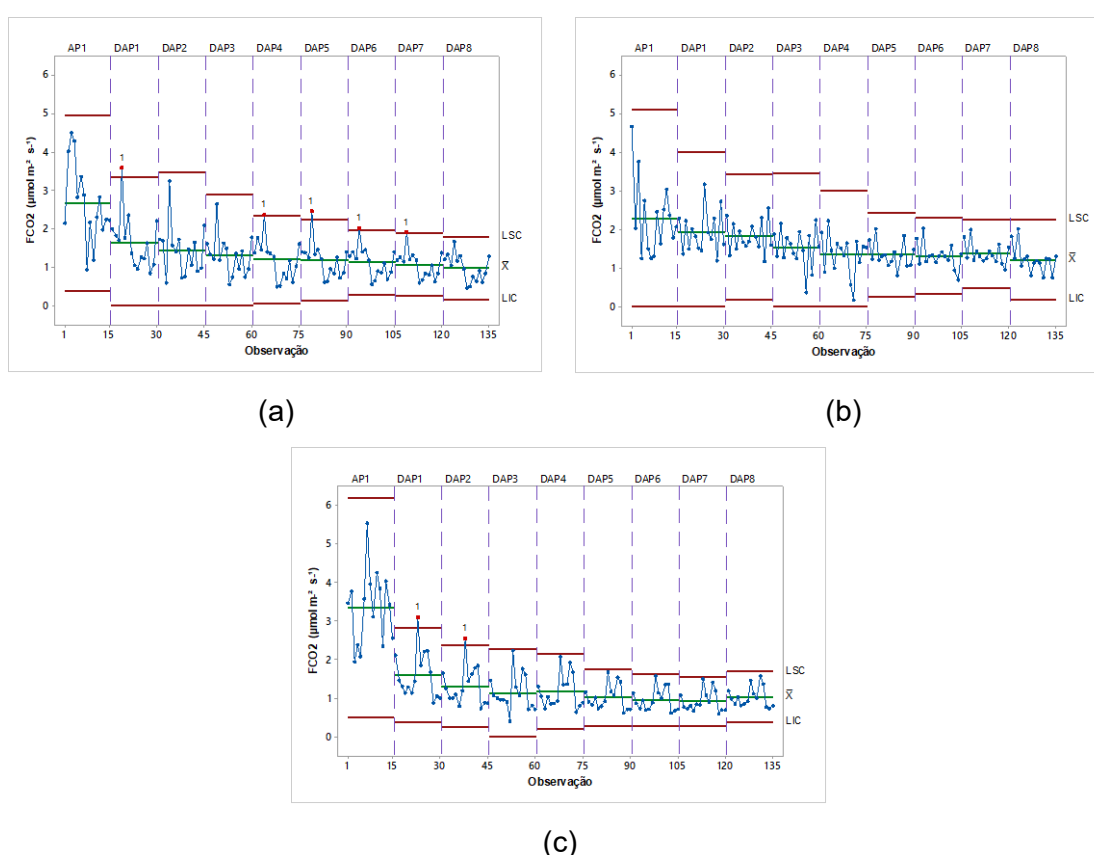


Figura 18. Cartas de controle individuais para emissão de CO_2 do solo (FCO2); (a) Preparo Convencional; (b) Preparo Reduzido; (c) Enxada Rotativa.

A produção de CO_2 no interior do solo é essencialmente um processo bioquímico, diretamente associado à atividade biológica, incluindo a respiração das raízes e a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos (Hanson et al., 2000). Com base nessa afirmação, é possível estabelecer que a emissão de CO_2 do solo está diretamente relacionada à sua atividade

respiratória. Assim, o preparo que apresentou as maiores médias de emissão pode ser interpretado como aquele que preservou mais intensamente as condições originais do solo, mantendo o acúmulo e o sequestro de carbono previamente existentes. Esse comportamento é compatível com as condições da área experimental, que apresentava elevada quantidade de material vegetal sobre o solo, conforme ilustrado nas Figuras 1, 3a e 4.

Como demonstrado pelas cartas de controle, os valores de emissão de CO₂, temperatura e umidade apresentaram grande variação entre os tratamentos. Para compreender de forma mais detalhada essa variabilidade, foi realizada uma análise descritiva dos dados coletados antes do preparo do solo (AP1), cujos resultados são apresentados na Tabela 6. Da mesma forma, efetuou-se a análise descritiva para os dados obtidos após o preparo (período de DAP1 a DAP8), apresentados na Tabela 8.

Tabela 6. Estatística descritiva da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo, nos sistemas de preparo do solo: preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR), enxada rotativa (ER) e não mobilizado (NM). (Antes do preparo).

Preparo	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Emissão de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹)						
ER	3,350 A	0,970	0,250	1,946	5,533	28,95
NM	3,248 AB	0,670	0,335	2,263	3,687	20,62
PC	2,664 AB	1,037	0,268	0,940	4,494	38,92
PR	2,293 B	0,972	0,251	1,241	4,665	42,38
Temperatura do solo (°C)						
ER	26,127 A	1,512	0,390	24,700	28,300	5,79
NM	25,325 AB	0,340	0,170	24,900	25,600	1,34
PC	24,800 B	0,464	0,120	23,900	25,600	1,87
PR	24,760 B	0,360	0,0930	24,000	25,500	1,45
Umidade do solo (%)						
ER	21,15 B	6,00	1,55	10,70	32,70	28,35
NM	25,40 AB	3,88	1,94	19,70	27,90	15,27
PC	25,70 AB	5,06	1,31	15,10	33,20	19,68
PR	28,727 A	3,007	0,776	23,200	34,800	10,47

*(ER, PC, PR)N = 15, **(NM)N = 4; médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Conforme apresentado na Tabela 7, o teste de Tukey indica que, mesmo antes da mobilização do solo, já havia diferenças significativas entre as parcelas de coleta de dados de cada tratamento. Entre as variáveis analisadas, a emissão de CO₂ apresentou a maior variabilidade, com coeficiente de variação variando de 20,62% a 42,32%. A temperatura do solo foi a variável com menor variação, com coeficientes entre 1,34% e 5,79%. A umidade apresentou variabilidade intermediária, com valores entre 10,47% e 28,35%.

De acordo com a análise descritiva dos dados obtidos após o preparo do solo, apresentada na Tabela 8, a média de emissão de CO₂ no preparo reduzido foi estatisticamente semelhante ao tratamento não mobilizado, registrando 1,486 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 1,593 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. Quanto à temperatura, a maior média foi observada no preparo convencional (29 °C), enquanto o tratamento não mobilizado apresentou a menor média (27,3 °C). Em relação à umidade do solo, o preparo convencional apresentou os maiores valores médios (20,6%).

Tabela 7. Estatística descritiva da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo, nos sistemas de preparo do solo: preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR), enxada rotativa (ER) e não mobilizado (NM). (Depois do preparo).

Preparo	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Emissão de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹)						
NM	1,593 A	0,282	0,050	0,998	2,157	17,73
PR	1,486 A	0,468	0,043	0,182	3,166	31,53
PC	1,251 B	0,536	0,049	0,452	3,587	42,84
ER	1,141 B	0,454	0,041	0,413	3,106	39,81
Temperatura do solo (°C)						
NM	27,341 C	0,973	0,172	25,700	29,600	3,56
PR	28,157 B	1,091	0,099	25,900	30,900	3,87
PC	29,009 A	1,166	0,106	24,800	30,900	4,02
ER	28,466 B	0,972	0,0887	25,500	30,400	3,41
Umidade do solo (%)						
NM	13,656 B	4,502	0,796	8,800	27,200	32,97
PR	11,301 C	3,610	0,330	5,800	24,700	31,95
PC	20,647 A	4,846	0,442	8,300	32,100	23,47
ER	10,692 C	4,955	0,452	4,900	26,900	46,35

*(NM)N = 32, *(PR, PC, ER)N = 120; médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Sendo assim, podemos afirmar que o preparo reduzido foi o sistema que mais contribuiu para a mitigação das emissões de CO₂, uma vez que a emissão média após o preparo correspondeu a 64,81% do valor registrado antes da intervenção. Esse resultado indica que o preparo reduzido preservou de forma mais eficiente as características originais do solo, evidenciando seu caráter mais conservacionista.

O preparo convencional apresentou uma proporção de 46,96% das emissões anteriores ao preparo, configurando um comportamento intermediário.

Já a enxada rotativa resultou em apenas 34,06% das emissões iniciais, caracterizando-se como o método de preparo mais agressivo ao solo, devido ao maior distúrbio causado à estrutura e à dinâmica biológica.

Utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (Tabela 9) para avaliar as associações entre emissão de CO₂ e temperatura do solo, e entre emissão de CO₂ e umidade do solo. Nos três sistemas de preparo, observou-se correlação inversa fraca entre emissão de CO₂ e temperatura; apenas no tratamento não mobilizado a correlação não foi significativa. Para a relação entre emissão de CO₂ e umidade, verificou-se correlação inversa fraca nos tratamentos com enxada rotativa e não mobilizado, enquanto os demais tratamentos não apresentaram correlação significativa.

Tabela 8. Correlação de Pearson entre a emissão de CO₂, a temperatura e a umidade do solo.

	Nº obs.	R	p valor
Preparo Reduzido			
T _{solo} (°C)	120	-0,266*	0,003
U _{solo} (%)	120	0,008 ^{NS}	0,935
Preparo Convencional			
T _{solo} (°C)	120	-0,381*	0,000
U _{solo} (%)	120	0,038 ^{NS}	0,683
Enxada Rotativa			
T _{solo} (°C)	120	-0,360*	0,000
U _{solo} (%)	120	-0,379*	0,000
Não Mobilizado			
T _{solo} (°C)	120	-0,211 ^{NS}	0,245
U _{solo} (%)	120	-0,362*	0,042

*Valor significativo (p < 0,05); ^{NS}Valor não significativo (p > 0,05)

5. CONCLUSÃO

A enxada rotativa, nas condições em que foi regulada, ocasionou elevado empolamento e baixo índice de rugosidade, caracterizando-se como o implemento que proporcionou a maior desagregação do solo.

O preparo convencional foi o sistema que apresentou o maior consumo de combustível, resultando, conseqüentemente, na maior emissão de CO₂ para a atmosfera.

O preparo reduzido com escarificador foi o mais eficiente na mitigação das emissões de CO₂, indicando maior capacidade de preservar as características originais do solo e reforçando seu caráter conservacionista.

REFERÊNCIAS

Brito filho, A. L.; Carneiro, F. M.; Souza, J. B. C.; Almeida, S. L. H.; Lena, B. P.; Silva, R. P. Does the soil tillage affect the quality of the peanut picker? *Agronomy*, v. 13, n. 4, e1024, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13041024.

Corrêa júnior, D.; Barbosa, B. H. G.; Marques filho, A. C.; Volpato, C. E. S.; Depaula, F. O.; Andrade, D. H. C.; Fontes, G. H. O.; Magalhães, R. R.; Ferreira, D. D. Embedded system for real-time monitoring of agricultural tractors slipping and fuel consumption. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 44, e20240038, 2024. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v44e20240038/2024.

Dadalto, J. P.; Fernandes, H. C.; Teixeira, M. M.; Cecon, P. R.; Matos, A. T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 506–513, 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p506-513/2015.

Hanson, P. J.; Edwards, N. T.; Garten, C. T.; Andrews, J. A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, v. 48, n. 1, p. 115–146, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>.

Hou, X.; Xu, C.; Li, J.; Liu, S.; Zhang, X. Evaluating agricultural tractors emissions using remote monitoring and emission tests in Beijing China. *Biosystems Engineering*, v. 213, p. 105–118, 2022.

Iamaguti, J. L.; Moitinho, M. R.; Teixeira, D. D. B.; Bicalho, E. da S.; Panosso, A. R.; La Scala junior, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade

do solo em área canavieira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 5, p. 497–504, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504.

Li-Cor biosciences. Using soil collars – LI-8100A Soil CO₂ Flux System. Lincoln, NE: LI-COR, [s.d.]. Acesso em: 13 set. 2025.

Moitinho, M. R.; Padovan, M. P.; Panosso, A. R.; La Scala junior, N. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1720–1728, 2013.

Monteiro, L. de A.; Lanças, K. P.; Guerra, S. P. S. Desempenho de um trator agrícola equipado com pneus radiais e com pneus diagonais para três níveis de lastros líquidos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 551–560, mai./jun. 2011.

Montgomery, D. C. Introduction to statistical quality control. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

Neto, L. S.; Kmiecik, L. L.; Jasper, S. P.; Zimmermann, G. G.; Savi, D. Operational and energy performance of 250 kW double wheeled versus rubber half-tracked tractors in the soybean sowing. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 40, n. 5, p. 617–623, 2020. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n5p617-623/2020.

Quoos, J. Triângulo textural. Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), [s.d.]. Disponível em: https://docente.ifsc.edu.br/joao.quoos/textura_solo/textura.html. Acesso em: 4 ago. 2025.

Santoro, J. F.; Kripka, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35–49, 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000200078.

Silva, E. de F.; Moitinho, M. R.; Teixeira, D. de B.; Pereira, G. T.; La Scala junior, N. Emissão de CO₂ do solo associada à calagem em área de conversão de laranja para cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 885–898, 2014.

Silva, R. P.; Cassia, M. T.; Voltarelli, M. A.; Compagnon, A. M.; Furlani, C. E. A. Qualidade da colheita mecanizada de feijão (*Phaseolus vulgaris*) em dois sistemas de preparo do solo. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 1, p. 61–69, 2013.

Stolf, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 229–235, 1991a.

Stolf, R.; Cassel, D. K.; King, L. D.; Reichardt, K. Measuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 189–196, 1998.

Stolf, R.; Reichardt, K.; Vaz, C. P. M. Response to “Comments on ‘Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer - TDR moisture probe’ and ‘A dynamic cone penetrometer for

measuring soil penetration resistance””. *Soil Science Society of America Journal*, v. 69, p. 927–929, 2005.

Teixeira, L. G.; Afonso, A.; La Scala junior, N. Variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo após preparo convencional e reduzido descrito por modelo exponencial decrescente no tempo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 224–231, 2010.

Trindade, C.; Rezende, J.; Jacovine, L.; Sartório, M. Ferramentas da qualidade: aplicação na atividade florestal. Viçosa, MG: UFV, 2007.

Vitória, E. L.; Simon, C. da P.; Lacerda, E. das G.; Freitas, I. L. de J.; Gontijo, I. Estimating CO₂ emissions from tilled soils through artificial neural networks and multiple linear regression. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 35, n. 4, p. 964–973, 2022.

Zerbato, C.; Furlani, C. E. A.; Oliveira, M. F. de; Voltarelli, M. A.; Tavares, T. de O.; Carneiro, F. M. Quality of mechanical peanut sowing and digging using autopilot. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 8, p. 630–637, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p630-637.

Zimmermann, G. G.; Savi, D.; Jasper, S. P.; Kmiecik, L. L.; Strapasson neto, L.; Sobenko, L. R. Energy performance of farm tractor with single radial versus dual diagonal wheels in harrowing operations. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 26, n. 5, p. 356–364, 2022. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p356-364.