

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

EDUARDA SANTANA SOARES

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NA CULTURA DE SORGO CONSORCIADO
SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

CHAPADÃO DO SUL-MS

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NA CULTURA DE SORGO GRANÍFERO
CONSORCIADO**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Mato Grosso do Sul, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Garcia
Roque

CHAPADÃO DO SUL-MS

2025



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA****CERTIFICADO DE APROVAÇÃO****DISCENTE:** Eduarda Santana Soares**ORIENTADOR:** Dr. Cassiano Garcia Roque**TÍTULO:** Atributos Físicos do Solo na Cultura do Sorgo em Sistema de Plantio Direto.**AVALIADORES:**

Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque

Prof. Dra. Dthenifer Cordeiro Santana

Prof. Dr. Marco Antonio Camillo de Carvalho

Chapadão do Sul, 07 de agosto de 2025.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Cassiano Garcia Roque, Professor do Magisterio Superior**, em 08/08/2025, às 14:44, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Marco Antonio Camillo de Carvalho, Usuário Externo**, em 08/08/2025, às 14:46, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Dthenifer Cordeiro Santana, Usuário Externo**, em 08/08/2025, às 14:47, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 5801252 e o código CRC 749452C2.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça de poder realizar este trabalho, que foi fundamental para minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram durante este período desafiador.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque, pela oportunidade de integrar seu grupo de pesquisa e desenvolver este projeto.

À Advanta Seeds, por acreditar em meu potencial e no meu trabalho, apoiando o desenvolvimento desta trajetória que se iniciou no TCC e segue até a tese de mestrado.

A todo o Grupo de Estudos em Manejo e Conservação de Solos (GEMCS), pelo apoio durante minha caminhada acadêmica e na implementação do experimento de mestrado.

EPÍGRAFE

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem”

Renato Russo

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
1.INTRODUÇÃO.....	12
2.MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.RESULTADOS.....	17
4 DISCUSSÃO.....	25
5 CONCLUSÃO.....	29
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura	pg
1 Fig 1. Comparação das médias de densidade do solo no sistema de plantio direto.....	19
2 Fig 2. Comparação das médias de umidade gravimétrica no sistema de plantio direto.....	19
3 Fig 3. Comparação de médias de porosidade total no sistema de plantio direto.....	20
4 Fig 4. Comparação de médias de microporosidade no sistema de plantio direto.....	21
5 Fig 5. Comparação de médias de macroporosidade no sistema de plantio direto.....	21
6 Fig 6. Comparação de médias de resistência a penetração no sistema de plantio direto.....	22
7 Fig 7. Comparação de médias de FCO ₂ no sistema de plantio direto.....	23
8 Fig 8. Comparação de médias de temperatura no sistema de plantio direto....	23
9 Fig 9. Análise de componentes principais (PCA).....	24

LISTA DE TABELAS

Tabelas	pg
1 Tabela de análise de variância	18

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NA CULTURA DE SORGO GRANÍFERO CONSORCIADO

RESUMO: Um ambiente físico favorável no solo é necessário e de fundamental importância para o crescimento e desenvolvimento radicular da cultura do sorgo, a fim de maximizar a produtividade das culturas plantadas. Neste estudo, avaliamos os aspectos físicos do solo em sistema de plantio direto em uma área de sorgo granífero consorciada com *Urochloa ruziziensis* e *Crotalaria spectabilis*, na segunda safra, com base em um experimento de campo de longa duração. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro tipos de cultivo (sorgo; sorgo + *Urochloa ruziziensis*; sorgo + *Crotalaria spectabilis*; sorgo + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*) e dois anos agrícolas (safras 2023 e 2024), sendo safra considerada como variável de efeito aleatório, totalizando 16 unidades experimentais e 4 repetições. Os atributos físicos do solo analisados incluíram densidade do solo (DS), umidade gravimétrica (UG), porosidade total (PT), microporosidade (MIC), macroporosidade (MAC) e resistência à penetração das raízes (RP), também o fluxo de CO₂ e temperatura. Os sistemas de cultivo influenciaram os atributos físicos e biológicos do solo, destacando-se o consórcio sorgo+crotalária, que melhorou a qualidade e a conservação do solo, evidenciando o potencial da integração de culturas como prática sustentável

Palavras-chave: rotação, manejo do solo, *Sorghum bicolor* L.

PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL IN GRAIN SORGHUM INTERCROPPING

ABSTRACT: A favorable physical environment in the soil is essential and of fundamental importance for the root growth and development of sorghum, in order to maximize crop productivity. In this study, we evaluated the physical aspects of the soil under a no-tillage system in a grain sorghum area intercropped with *Urochloa ruziziensis* and *Crotalaria spectabilis* during the second season, based on a long-term field experiment. The experimental design was a randomized block, with four cropping systems (sorghum; sorghum + *Urochloa ruziziensis*; sorghum + *Crotalaria spectabilis*; sorghum + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*) and two crop years (2023 and 2024), with crop year considered as a random effect, totaling 16 experimental units and 4 replications. The soil physical attributes analyzed included soil bulk density (BD), gravimetric moisture (GM), total porosity (TP), microporosity (MIC), macroporosity (MAC), and root penetration resistance (PR), as well as CO₂ flux and soil temperature. The cropping systems influenced the physical and biological attributes of the soil, with the sorghum + *Crotalaria* intercrop standing out for improving soil quality and conservation, highlighting the potential of crop integration as a sustainable management practice.

Keywords: rotation, soil management, Sorghum bicolor L.

1. INTRODUÇÃO

O Sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma gramínea de origem tropical, cujo centro de dispersão abrange a África e partes da Ásia. Conforme dados fornecidos pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) referentes à safra de sorgo 2023/2024, o Brasil apresenta uma área cultivada de 1.237,2 milhões de hectares, com produção totalizando 3.904,1 milhões toneladas e uma produtividade média de 3.155 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023).

Essa cultura destaca-se pelo seu considerável potencial de produtividade, revelando tolerância a amplas variações de temperatura e a períodos prolongados de estiagem, possibilitando seu cultivo em regiões semiáridas e áridas. Consoante a registros, a cultura do sorgo assume importância substancial tanto na alimentação humana quanto animal, bem como na geração de energia, destacando-se por sua adaptabilidade em uma extensa gama de regiões (SILVA et al., 2014; FERREIRA et al., 2019). O sorgo pode ser uma excelente cultura para rotação, pois se destaca pelo considerável potencial de produtividade, demonstrando tolerância a amplas variações de temperatura e períodos prolongados de seca (FERREIRA et al., 2019). De acordo com registros, o cultivo do sorgo é de grande importância tanto para o consumo humano quanto animal, além de produção de energia, sendo notável por sua adaptabilidade a uma ampla gama de regiões (SILVA et al., 2014).

Em comparação com a monocultura, os benefícios do cultivo consorciado são variados, destacando-se, sobretudo, uma maior produção de biomassa por unidade de área, preservação do solo contra a erosão, sequestro eficiente de carbono, ciclagem de nutrientes e a capacidade de integrar múltiplas atividades econômicas na mesma área, destacando-se na redução no uso de fertilizantes minerais (ZHANG & LI, 2003; OLIVEIRA et al., 2010; MARTIN-GUAY et al., 2018; MINGOTTE et al., 2020, 2021). A adoção do sistema de plantio na entrelinha de consórcio emerge como uma opção notável para o plantio direto, com o intuito de otimizar a produção de grãos e biomassa durante a entressafra, além de favorecer a descompactação dos solos. (HORVATHY NETO et al., 2012).

O sistema de plantio direto (SPD) é uma técnica de manejo conservacionista que envolve mínima perturbação do solo, manutenção da cobertura permanente do solo, rotação de culturas e diversificação de espécies. Além disso, inclui um processo de colheita-semeadura destinado a aumentar o número de cultivos e o tempo em que o solo

permanece coberto por plantas (POSSAMAI et al., 2022). Este método aprimora a estrutura do solo, promove a atividade biológica, otimiza o ciclo de nutrientes e melhora tanto a capacidade de retenção de água quanto as propriedades de infiltração do solo (HELLNER ET AL., 2018; BORGES ET AL., 2018). Como resultado, o plantio direto é reconhecido como uma prática sustentável para a produtividade agrícola a longo prazo (LI ET AL., 2019). No entanto, esses princípios fundamentais do sistema de plantio direto nem sempre são aplicados, com muitas áreas adotando um modelo simplificado, que frequentemente resulta em alterações na qualidade estrutural do solo e aumento da compactação do solo (DRESCHER, 2015). Comparado à monocultura de sorgo, os benefícios do consórcio de culturas são variados, destacando-se a maior produção de biomassa por unidade de área, preservação do solo contra erosão, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes e a capacidade de integrar múltiplas atividades econômicas na mesma área (MARTIN-GUAY et al., 2018).

Atributos físicos do solo como densidade, porosidade e resistência à penetração influenciam diretamente no crescimento e desenvolvimento das culturas, sendo indicadores de qualidade física (ARCOVERDE, 2022). Alterações nesses atributos podem limitar o crescimento e o volume explorado da raiz (COLOMBI et al, 2018), reduzir a água e absorção de nutrientes (VALADÃO et al., 2017), impedir trocas gasosas, diminuir a taxa de infiltração e fluxo de água no solo (ZAMBRANA et al., 2010), reduzir o crescimento (KIRNAK et al,2016) e a produção de gramíneas (ARCOVERDE et al., 2022). Essa prática melhora a qualidade do solo aumentando a macroporosidade e as taxas de infiltração de água, diminuindo a resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2016; SULZBACH et al., 2017; RUFFATO et al., 2019) e formando bio-poros estáveis que facilitam o fluxo de água, movimento do ar e crescimento das raízes para as culturas subsequentes (HASKEL, 2020). Além disso, a acumulação de matéria orgânica ajuda a reter a umidade, tornando os solos mais resistentes à compactação (BRAIDA et al., 2006).

Em resumo, áreas com camadas compactadas exibem diminuição da macroporosidade e aumento da microporosidade, densidade do solo e resistência à penetração do solo (DRESCHER, 2015). Isso resulta em redução da infiltração de água e troca gasosa no solo (VALICHESKI et al., 2012), maior retenção de água (REICHERT et al., 2007) e crescimento reduzido dos sistemas radiculares e das partes aéreas das plantas (SHAHEB, 2020). Uma prática adicional para reduzir ou prevenir a compactação do solo é o uso de sistemas de rotação de culturas, que envolvem espécies com sistemas

radiculares fortes e diversos que podem prosperar em solos compactados (MICHELON. C, 2023).

A implementação do consórcio com gramíneas forrageiras, como a *Urochloa ruziziensis*, e leguminosas, como a *Crotalaria spectabilis*, é propícia para melhorar o índice de cobertura vegetal do solo, em contraste com ervas daninhas, enfatizando a preferência pelo plantio direto na safra subsequente (BALBINOT JUNIOR et al., 2017). Em geral, taxas de emissão de CO₂ aumentam com o incremento da temperatura até certo limite fisiológico (ATKIN et al., 2000; XU e BALDOCCHI, 2004). Estudos mais recentes confirmam que práticas de manejo como o uso de culturas de cobertura e consórcios vegetais promovem maior atividade biológica e, conseqüentemente, aumento no fluxo de CO₂, principalmente em solos tropicais, devido ao aumento da biomassa microbiana e da disponibilidade de carbono lábil (GUÉVARA et al., 2024; GOUJOU LIAS et al., 2023).

A quantificação dos fluxos de CO₂ é essencial para compreender o papel das culturas agrícolas no sequestro ou emissão de carbono, e nesse contexto, técnicas como a covariância de vórtices turbulentos (eddy covariance) têm sido amplamente utilizadas (ZHOU ET AL., 2022). Estudos recentes demonstraram que o sorgo pode atuar como um sumidouro de carbono, com taxas diárias líquidas de troca de carbono (NEE – Net Ecosystem Exchange) de até -12 g C m^{-2} , valores semelhantes aos observados em culturas tradicionais como o milho (ZHOU ET AL., 2022). Além da troca direta com a atmosfera, o sorgo também influencia o acúmulo de carbono no solo, especialmente quando cultivado em sistemas destinados à produção de bioenergia.

Considerando a importância das práticas de manejo do solo, avaliamos a influência do consórcio do sorgo granífero com *Urochloa ruziziensis* e *Crotalaria* nos aspectos físicos do solo em um sistema de plantio direto e no fluxo de CO₂.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de condução do experimento

O estudo foi conduzido no campo experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul-MS (18°46'17.7"S, 52°37'27.7"W, altitude 813 m), durante a segunda safra de 2023. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é tropical úmido (Aw), com estação chuvosa no verão e estação seca no inverno, com

precipitação média anual de 1.850 mm e umidade relativa média anual de 64,8%, apresentando temperatura média anual variando de 13°C a 28°C. O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, de textura argilosa (SANTOS et al., 2018).

2.2 Histórico da área

A área experimental vem sendo manejada desde fevereiro de 2021 com rotação de culturas em sistema de plantio direto. Iniciou-se com o plantio de milho consorciado com *U. ruziziensis*, guandu e *Stylosanthes campo grande*, seguido por soja na safra 2021/2022. Na safra 2022, foram implementados nabo forrageiro e milheto, e posteriormente, soja na safra 2022/2023, mantendo o sistema de rotação. Na safra 2023, iniciou-se o experimento de consórcio de sorgo, que é o objeto de avaliação deste experimento.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro tipos de cultivo (sorgo; sorgo + *Urochloa ruziziensis*; sorgo + *Crotalaria spectabilis*; sorgo + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*) e dois anos agrícolas (safras 2023 e 2024), sendo safra considerada como variável de efeito aleatório. O experimento totalizou 16 unidades experimentais e 4 repetições. Cada unidade experimental foi composta por 12 linhas de 7 metros de comprimento, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e uma população de 9 sementes por metro, resultando em 915 plantas por unidade experimental e 186.000 plantas por hectare.

2.4 Plantio e tratos culturais

O híbrido de sorgo utilizado foi o ADV1151IG (livre de tanino), que possui tecnologia de resistência a herbicidas da família das imidazolinonas, Imazapic + Imazethapyr, chamada igrowth®, permitindo o consórcio de sorgo com culturas de cobertura. O consórcio de *Urochloa ruziziensis* (350 PVC entre as fileiras) e *Crotalaria spectabilis* (15 kg ha⁻¹ entre as fileiras) foi realizado manualmente.

A taxa de fertilizante utilizada foi de 313 kg ha⁻¹ da formulação 04-14-08 aplicada no sulco de plantio, com base na análise de solo e recomendações de fertilização para sorgo grão extraídas do boletim de correção e fertilização do Cerrado (SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E., 2004).

Durante o ciclo da cultura, foram realizadas aplicações de inseticidas para controle de pragas com as seguintes doses: Acefato + Bifentrina a 1,2 kg ha⁻¹ para controle de lagartas, pulgões e percevejos; Teflubenzuron a 240 mL ha⁻¹ para controle de lagartas; Clorfenapir a 750 mL ha⁻¹ para controle de lagartas e pulgões; e Alfa-cipermetrina + Teflubenzuron a 500 mL ha⁻¹ para controle de lagartas. Para o controle de doenças (principalmente antracnose, turcicum e ergot), foi utilizado o fungicida Trifloxistrobina + Tebuconazol na dose de 0,6 L ha⁻¹. Todas as aplicações foram feitas utilizando um adjuvante contendo 60 g L⁻¹ de óleo de casca de laranja na dose de 0,15 L ha⁻¹.

2.5 Análises físicas do solo

Para as análises físicas, foram escavadas trincheiras com dimensões de 0,50 m de largura por 0,50 m de comprimento e 0,40 m de profundidade. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,00 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 e 0,30 - 0,40 m. Os atributos físicos do solo analisados foram densidade do solo (DS), umidade gravimétrica (UG), porosidade total (PT), microporosidade (MIC), macroporosidade (MAC) e resistência à penetração radicular (RP).

A densidade do solo (DS) foi determinada usando o método do anel volumétrico com base na relação massa/volume e para a determinação da porosidade (TEIXEIRA et al., 2017), com a seguinte equação:

$$Pt = \frac{[(a - b) - (c - d)]}{e}$$

Sendo: Pt- Porosidade total, em m³ m⁻³.

a - Massa da montagem do cilindro de amostra saturada com tecido, em kg.

b - Massa da montagem do cilindro de amostra seca a 105°C, em kg.

c - Massa da montagem do cilindro saturado com tecido, em kg.

d - Massa da montagem do cilindro seco a 105°C, em kg.

e - Volume total da amostra, em m³. Neste caso, assume-se que o volume total da amostra é igual ao volume do cilindro.

A microporosidade foi determinada seguindo a metodologia descrita por (TEIXEIRA et al., 2017), submetendo as amostras a uma tensão de -6 KPa. A macroporosidade foi calculada como a diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA et

al., 2017). Amostras de solo perturbado foram coletadas para determinar o teor gravimétrico de umidade (UG) usando um trado holandês.

A resistência à penetração foi avaliada utilizando um penetrômetro digital eletrônico (PenetroLOG), operado manualmente e dependente principalmente da força do operador. Ele mede a profundidade de penetração da haste e inclui cálculos para a velocidade de penetração, com alertas para desvios da faixa padrão (MOLIN, 2012).

2.6 Fluxo de CO₂ e Temperatura

Em cada área foi fixado no solo 100 colares de PVC com 24 horas de antecedência em cada ponto, antes da primeira leitura em 15 de abril de 2023 e permaneceram na área até a última mensuração que foi realizada com um sistema portátil EGM-5 (PP-Systems, Amesbury, EUA), modelo AGA560. Os procedimentos para a mensuração de emissão in situ de CO₂ do solo (FCO₂) foram de acordo com (TEODORO et al., 2024). O equipamento monitora as variações da concentração de CO₂ no interior da câmara de PVC do solo por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho (ACS041).

Os dados foram analisados utilizando o software R para análise de variância, e, quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). O software Excel foi utilizado para elaborar as figuras.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 de análise de variância (Tabela 1) contém o efeito de diferentes fontes de variação, incluindo tipo de cultura e profundidade, sobre várias propriedades do solo, como densidade do Solo (DS), umidade gravimétrica (UG), porosidade total (PT), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), resistência à penetração de raízes (RP), fluxo de CO₂ (FCO₂) e temperatura (T).

Tabela 1. Análise de Variância das variáveis Densidade do solo (DS), Umidade gravimétrica (UG), Porosidade Total (PT), Microporosidade (MICRO), Macroporosidade (Macro), Resistência a penetração (RP), fluxo de CO₂ (FCO₂) e temperatura (T).

Fontes de variação	G.L. ¹	DS g cm ⁻³	UG -----%	PT	Micro	Macro	RP MPa	FCO ₂ μmol m ⁻² s ⁻¹	T °C
BLOCO		0,25	5,21	1,45	15,61	4,11	0,28	0,38	9,19
Safra (S)	3	0,50 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,125 ^{ns}	0,28 ^{ns}	11,06 ^{ns}	0,131 ^{ns}	0,002 ^{ns}	75,07 ^{ns}
Culturas (C)	3	0,083 ^{ns}	16,12*	19,13*	15,94*	0,58*	1,78*	7,54*	29,78*
S x C	9	0,083 ^{ns}	1,50 ^{ns}	5,45 ^{ns}	6,47 ^{ns}	10,47 ^{ns}	0,61 ^{ns}	2,75 ^{ns}	34,80 ^{ns}
Erro	45	0,083	1,30	4,31	6,33	4,29	0,26	0,18	23,86
CV (%)	-	15,40	5,18	5,04	7,32	36,17	28,48	14,62	25,75
Média	-	1,88	22,06	41,18	38,28	2,38	1,78	2,94	18,97

¹Graus de liberdade. * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste F ao nível 5% de probabilidade.

A análise de variância indicou que o fator safra não apresentou efeito significativo ($p > 0,05$) sobre nenhuma das variáveis físico-hídricas e mecânicas do solo avaliadas, sugerindo que, nas condições experimentais, as variações entre os anos agrícolas não influenciaram de forma consistente os atributos do solo. Em contrapartida, o fator culturas apresentou efeito significativo ($p < 0,05$) sobre as variáveis umidade gravimétrica (UG), porosidade total (PT), resistência à penetração (RP) e força de coesão do solo (FCO₂), evidenciando que o tipo de cultivo tem impacto direto sobre a estrutura física e a resistência mecânica do solo.

Os coeficientes de variação (CV) oscilaram entre 5,04% e 36,17%, com a maioria das variáveis apresentando valores considerados aceitáveis para experimentos de campo, o que reflete boa precisão e controle experimental. As médias gerais observadas foram: densidade do solo (1,88 g cm⁻³), umidade gravimétrica (22,06%), porosidade total (41,18%), microporosidade (38,28%), macroporosidade (2,38%), resistência à penetração (1,78 MPa), força de coesão do solo (2,94 MPa) e temperatura (18,97 °C), valores que servem de referência para a caracterização física do solo nas diferentes condições avaliadas.

Na figura 1 a densidade do solo variou significativamente entre os diferentes sistemas de cultivo avaliados. O consórcio sorgo + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis* apresentou a menor densidade (1,75 g cm⁻³), diferindo estatisticamente das demais culturas. Já os tratamentos sorgo + crotalária (1,80 g cm⁻³), sorgo + *Urochloa*

ruziziensis ($1,85 \text{ g cm}^{-3}$) e sorgo em monocultivo ($2,00 \text{ g cm}^{-3}$) não diferiram entre si, apresentando os maiores valores de densidade do solo. Esses resultados evidenciam que a presença conjunta das duas espécies de cobertura promoveu maior efeito positivo na redução da densidade do solo em relação aos demais sistemas.

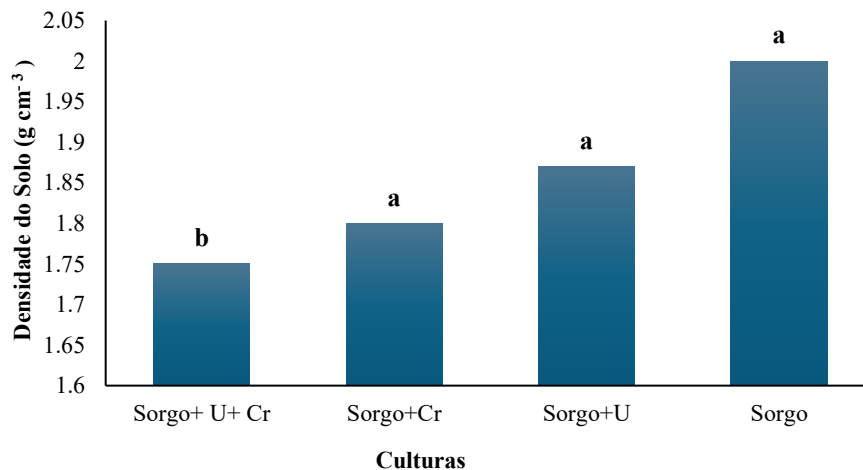


Figura 1. Comparação das médias de densidade do solo no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na figura 2 os valores de umidade gravimétrica do solo variaram em função dos sistemas de cultivo avaliados. O monocultivo de sorgo apresentou o menor valor (20,9%), estatisticamente semelhante ao consórcio sorgo + crotalária (21,3%). Por outro lado, os maiores valores de umidade foram observados nos tratamentos sorgo + *Urochloa ruziziensis* (22,1%) e sorgo + *Urochloa ruziziensis* + crotalária (22,2%), que não diferiram entre si, mas foram superiores aos demais sistemas de cultivo.

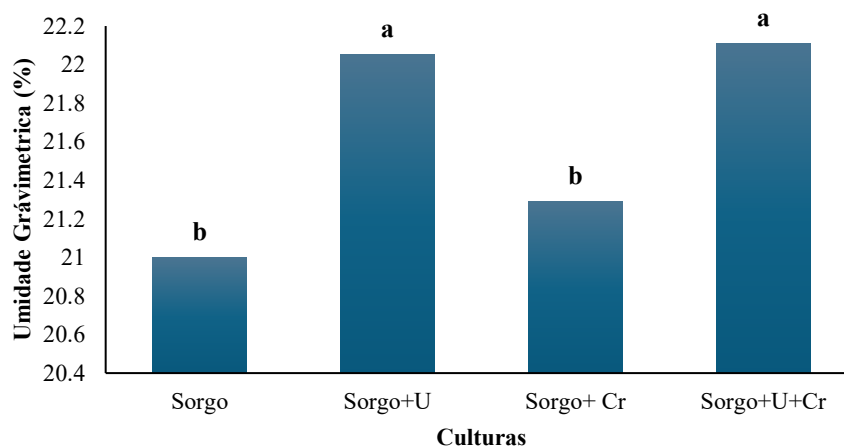


Fig 2. Comparação das médias de Umidade Gravimétrica no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na figura 3 a porosidade total do solo variou em função dos sistemas de cultivo avaliados. Os maiores valores foram observados no monocultivo de sorgo (47,6%) e no consórcio sorgo + crotalária (46,9%), que não diferiram estatisticamente entre si. Por outro lado, os menores valores de porosidade foram encontrados nos tratamentos sorgo + *Urochloa ruziziensis* (44,6%) e sorgo + *U. ruziziensis* + crotalária (42,6%), os quais também não apresentaram diferença entre si, mas foram estatisticamente inferiores aos demais sistemas.

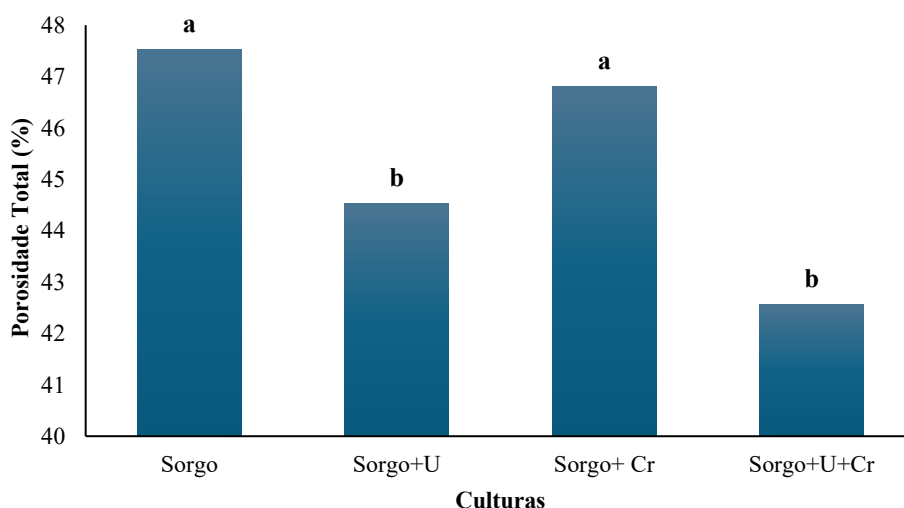


Figura 3. Comparação das médias de Porosidade Total no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na figura 4 a microporosidade do solo apresentou diferenças significativas entre os sistemas de cultivo. Os maiores valores foram observados no monocultivo de sorgo (38,8%) e no consórcio sorgo + *Urochloa ruziziensis* (38,3%), que não diferiram estatisticamente entre si. Em contrapartida, os menores valores ocorreram nos tratamentos sorgo + crotalária (35,5%) e sorgo + *U. ruziziensis* + crotalária (32,7%), os quais também não apresentaram diferença entre si, mas foram estatisticamente inferiores aos demais.

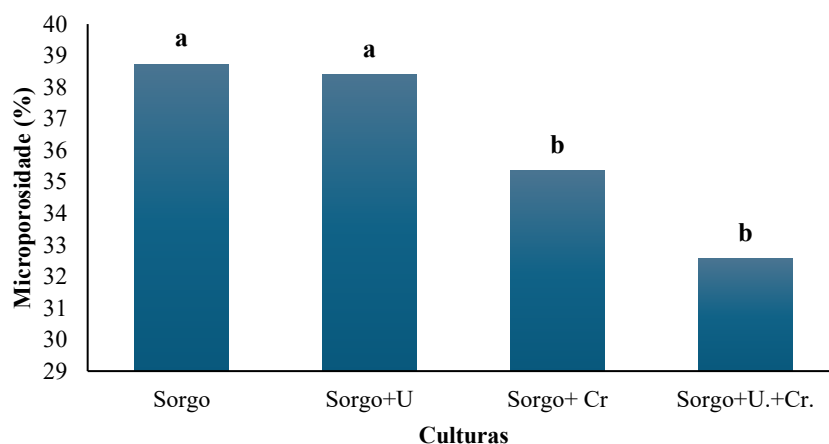


Figura 4. Comparação das médias de Microporosidade no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na figura 5 a macroporosidade do solo apresentou diferenças significativas entre os sistemas de cultivo. Os tratamentos com crotalária apresentaram maiores valores, sendo observado 12% no consórcio sorgo + crotalária e 10,5% no consórcio sorgo + *U. ruziziensis* + crotalária. Já o sorgo em monocultivo (8,5%) e o consórcio sorgo + *U. ruziziensis* (8,0%) apresentaram os menores valores, não diferindo estatisticamente entre si.

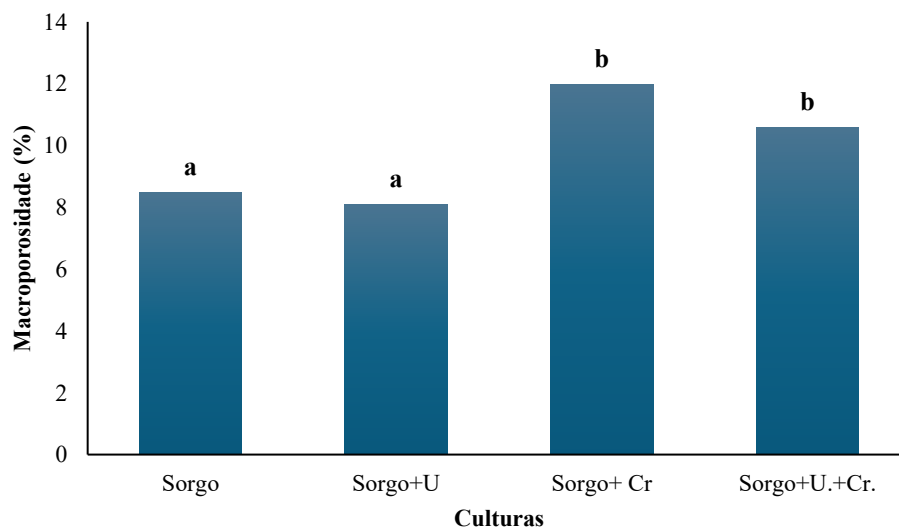


Fig 5. Comparação das médias de Macroporosidade no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na figura 6 a resistência à penetração do solo apresentou variação conforme a profundidade e o sistema de cultivo. Em todas as áreas, os valores de RP foram baixos na camada superficial (0–10 cm), situando-se abaixo de 1,0 MPa, mas aumentaram progressivamente em maiores profundidades. Entre 15 e 25 cm, os valores se aproximaram de 2,0 MPa, evidenciando maior compactação nessa faixa. O consórcio sorgo + crotalária e o consórcio sorgo + *U. ruziziensis* + crotalária apresentaram menores valores de RP ao longo do perfil, especialmente entre 20 e 35 cm, indicando efeito positivo dessas espécies na descompactação do solo. Em contraste, o sorgo em monocultivo e o consórcio sorgo + *U. ruziziensis* apresentaram maiores valores de RP nas camadas mais profundas, chegando a superar 2,0 MPa em torno de 25–30 cm.

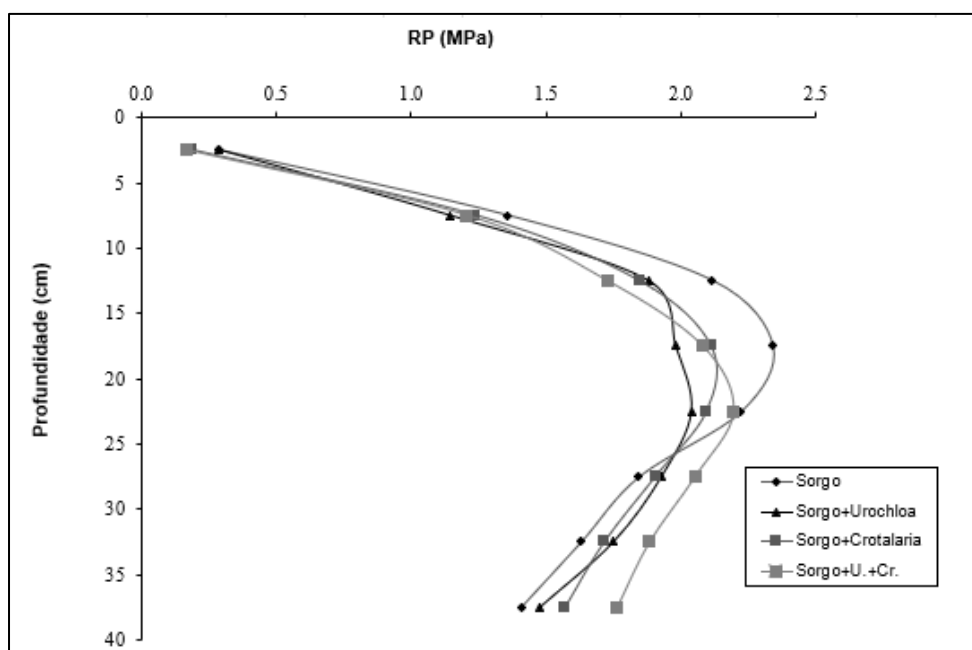


Fig 6. Comparação das médias de resistência a penetração no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 7 o fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) variou significativamente entre os diferentes tipos de cultivo avaliados (Figura 1). O tratamento com cultivo exclusivo de sorgo apresentou o menor valor de emissão, com fluxo médio de $2,25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Valores ligeiramente superiores foram observados nos consórcios Sorgo+ *Urochloa* ($2,62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e Sorgo+ Crotalaria ($2,50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sem diferenças expressivas

entre eles. O maior fluxo foi registrado no consórcio Sorgo+ *Urochloa*+ Crotalaria, com valor médio de $4,37 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, representando um incremento superior a 90% em relação ao cultivo exclusivo de sorgo.

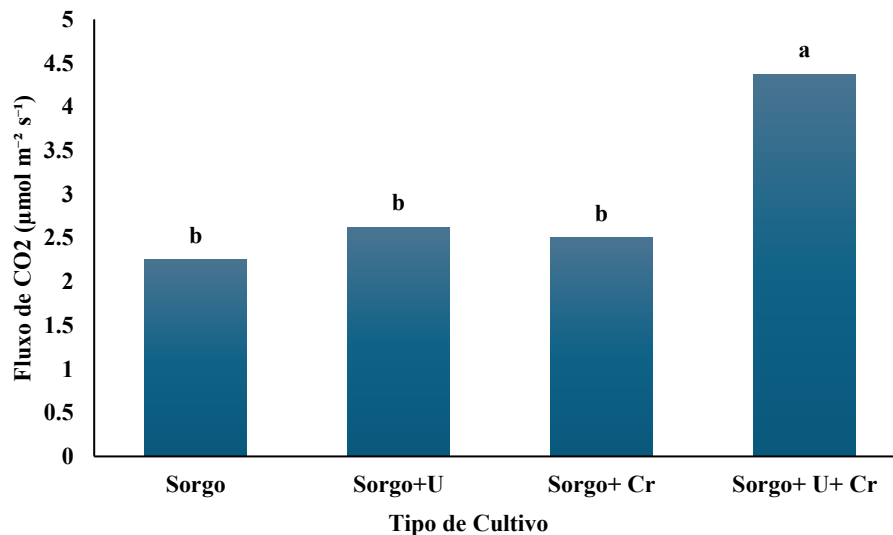


Fig 7. Comparação das médias do Fluxo de CO₂ no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Na figura 8 observou uma redução progressiva na temperatura do solo em função dos diferentes tratamentos com sorgo. O cultivo exclusivo de sorgo apresentou a maior temperatura, com média de 25 °C. A adição de ureia (Sorgo+ U) resultou em uma leve diminuição, registrando 22,62 °C. Já o uso de cobertura com cobertura morta (Cr), isoladamente (Sorgo+ Cr), promoveu uma redução mais acentuada, com temperatura média de 15,37 °C. A combinação da adubação com ureia e cobertura morta (Sorgo+ U+ Cr) proporcionou a menor temperatura observada, de 12,37 °C.

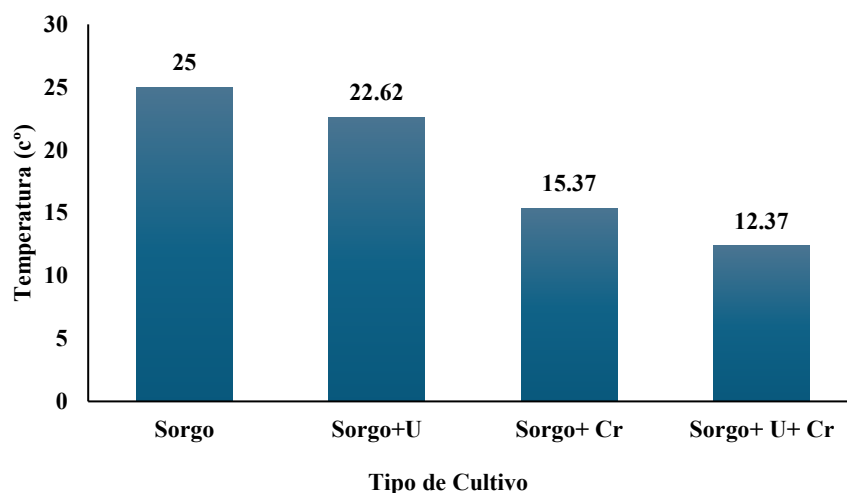


Fig 8. Comparação das médias de Temperatura no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

A análise de componentes principais (PCA) na figura 9, explicou 36,3% da variabilidade total dos dados, sendo 20,1% no eixo Dim1 e 16,2% no eixo Dim2, evidenciando distinção entre os sistemas de manejo. O tratamento solteiro agrupou-se no quadrante direito, associado a variáveis microbiológicas e de respiração do solo (UG1, Micro2, Temp, CO₂ e DS1–DS4), indicando maior atividade microbiana. O sistema sorgo+cr posicionou-se próximo ao centro, mas levemente à esquerda, correlacionado com atributos físicos como resistência à penetração (RP2–RP4) e estabilidade de agregados (BS2). Já o sorgo+u concentrou-se no quadrante inferior direito, relacionando-se fortemente a variáveis microbianas e de respiração, enquanto o tratamento sorgo+u+cr foi separado no quadrante superior esquerdo, em estreita associação com os indicadores de macrofauna (Macro1–Macro4), sugerindo que a integração entre sorgo e crotalária favoreceu maior diversidade e complexidade biológica no solo.

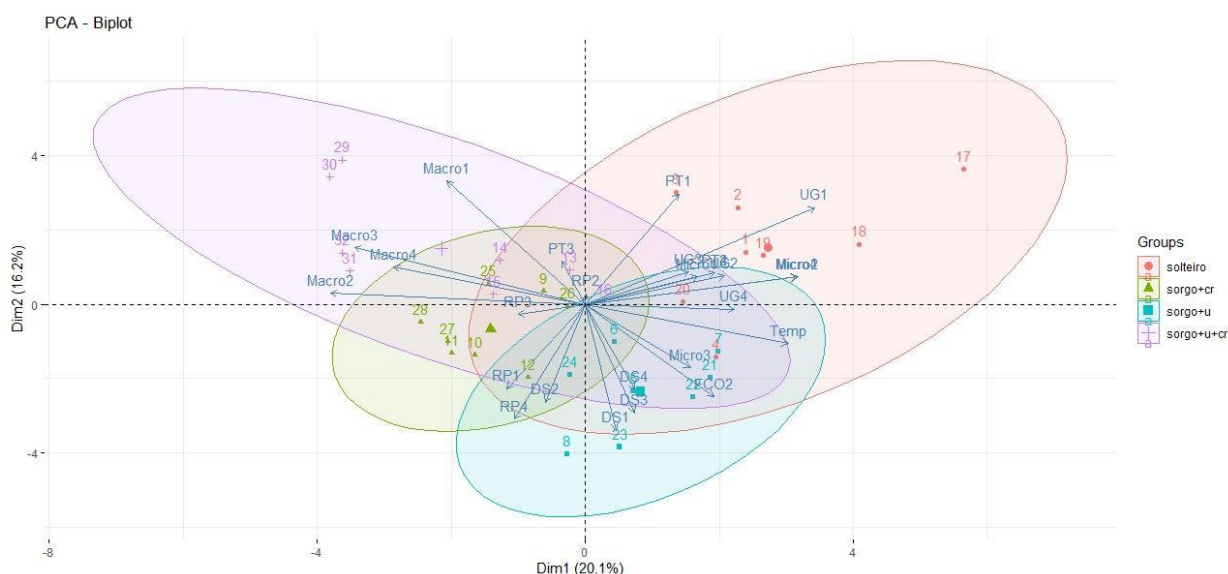


Fig 9. Análise de componentes principais (PCA) no sistema de plantio direto. Letras minúsculas diferentes na mesma camada indicam diferenças significativas entre profundidades pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

4. DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o tipo de cultivo (culturas) influencia de maneira significativa variáveis como umidade gravimétrica, porosidade total, resistência à penetração e força de coesão do solo, corroborando estudos recentes que apontam o papel determinante das raízes e da cobertura vegetal na dinâmica físico-hídrica do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2023). Resultados semelhantes reportaram, em condições de Cerrado, que a adoção de milho, sorgo ou milheto como culturas na entressafra reduziu a resistência à penetração em até 20%, além de favorecer a macroporosidade e a relação água-ar em solos compactados (FERREIRA et al., 2023). Essas evidências apontam que a escolha da cultura pode modular atributos críticos como a porosidade e a resistência mecânica, justificando os efeitos significativos observados nas variáveis UG, PT, RP e FCO2.

As altas precisões experimentais, indicadas pelos coeficientes de variação (CV), variando entre 5,04% e 36,17%, fortalecem a confiabilidade dos dados obtidos, sendo

compatíveis com estudos que apontam melhorias nas propriedades físico-hídricas do solo sob sistemas de plantio direto com cobertura vegetal, especialmente quanto à retenção de água, estabilidade estrutural e incremento da macroporosidade (JABRO et al., 2022).

A redução da densidade do solo observada no consórcio de sorgo com *Urochloa ruziziensis* e *Crotalaria spectabilis* indica efeito positivo da diversificação de culturas na melhoria da estrutura física, favorecendo maior acúmulo de carbono e possíveis reduções líquidas de emissões de CO₂. Estudos demonstram que sistemas consorciados aumentam o aporte de biomassa e, conseqüentemente, o estoque de carbono no solo, como verificado no Cerrado brasileiro, onde o consórcio sorgo + *U. ruziziensis* apresentou maiores teores de carbono orgânico em comparação ao monocultivo (SILVA et al., 2019). Além disso, a inclusão de leguminosas nos sistemas de cultivo contribui para maior ciclagem de nutrientes e estímulo à atividade microbiana, o que pode elevar temporariamente a respiração do solo e a emissão de CO₂, mas, em médio e longo prazo, resulta em maior retenção de carbono (BASCHÉ et al., 2014; LI et al., 2024). Meta-análises recentes também destacam que a consorciação, sobretudo em combinações cereal-leguminosa, tende a melhorar o balanço de carbono e reduzir a intensidade líquida das emissões de gases de efeito estufa (LIU et al., 2024).

A maior umidade gravimétrica observada nos sistemas consorciados, especialmente sorgo + *Urochloa ruziziensis* e sorgo + *U. ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*, reforça a capacidade das culturas de cobertura em melhorar a retenção de água no solo, devido ao incremento de resíduos vegetais e maior cobertura superficial, logo a literatura aponta que a consorciação entre gramíneas e leguminosas contribui para maior acúmulo de biomassa e raízes em diferentes profundidades, favorecendo a infiltração e reduzindo perdas por evaporação (CARVALHO et al., 2017). Esses efeitos se refletem diretamente na dinâmica do carbono, uma vez que solos mais úmidos apresentam condições favoráveis para atividade microbiana e respiração do solo, aumentando o fluxo de CO₂, mas também favorecendo o sequestro de carbono a longo prazo pelo aporte de matéria orgânica estável (BASCHÉ et al., 2016; LIU et al., 2024). Em sistemas de plantio direto, a diversificação de culturas tem sido associada à maior resiliência hídrica e eficiência no uso da água, aspectos que contribuem para mitigação das emissões líquidas de gases de efeito estufa e maior sustentabilidade agrícola (SILVA et al., 2019; LI et al., 2024).

Estudos anteriores também demonstraram que a *Urochloa* pode melhorar as propriedades físicas do solo, resultando em maior capacidade de retenção de água. Por exemplo, (CRUSCIOL ET AL., 2010) relataram que a introdução de *Urochloa* em sistemas de cultivo aumenta a porosidade do solo e a infiltração de água, contribuindo para uma melhor conservação da umidade. Isso está alinhado com estudos que sugerem que o efeito da Crotalaria na umidade do solo pode ser menos pronunciado em comparação com outras culturas de cobertura (PACHECO ET AL., 2011). Ademais, práticas agrícolas que promovem a incorporação de matéria orgânica e minimizam a perturbação do solo, como a cobertura vegetal e sistemas de plantio direto, são eficazes no aumento dos estoques de carbono orgânico do solo, melhorando assim a capacidade de retenção de água (ŽIŪRAITIS ET AL., 2024).

A redução da porosidade total observada nos consórcios sorgo + *Urochloa ruziziensis* e sorgo + *U. ruziziensis* + crotalária pode comprometer o balanço de gases do solo, uma vez que a porosidade influencia diretamente a difusão de O₂ e CO₂ e as condições para a atividade microbiana (DAS, 2024). Práticas que aumentam a porosidade, como o uso de culturas de cobertura que têm demonstrado promover maiores macroporos e conectividade no solo, o que favorece a respiração microbiana e pode intensificar fluxos de CO₂, mas também melhorar a infiltração e o armazenamento de carbono orgânico em estruturas estáveis (HARUNA et al., 2020; CERCIOGLU et al., 2018). Em sistema de plantio direto com cobertura, observou-se que a preservação dessas estruturas porosas associada à maior retenção de água motiva um primeiro aumento nos fluxos de CO₂, seguido de estabilização e maior sequestro de carbono (VYTAUTAS MAGNUS UNIV., 2019).

A redução da microporosidade observada nos consórcios sorgo + crotalária e sorgo + *Urochloa ruziziensis* + crotalária indica menor capacidade do solo em reter água em poros finos, o que pode limitar a disponibilidade hídrica às plantas em períodos de déficit e reduzir a atividade microbiana associada à estabilização do carbono. A microporosidade é um atributo diretamente relacionado à retenção de água em potenciais matriciais mais elevados, desempenhando papel essencial na manutenção da umidade e na regulação dos fluxos de CO₂ no solo (DEXTER et al., 2008). Estudos recentes mostram que práticas de manejo e consorciação influenciam a distribuição de micro e macroporos, impactando a difusão de gases e a respiração do solo (MANGALASSERY et al., 2019; CHEN et al., 2023). Em condições de baixa microporosidade, a oxigenação tende a ser

favorecida, estimulando respiração microbiana e emissão de CO₂; contudo, essa condição pode comprometer o estoque de carbono a longo prazo devido à menor proteção física da matéria orgânica nos microporos (ZHANG et al., 2021).

Já o incremento da macroporosidade nos consórcios com crotalária está relacionado à contribuição de seu sistema radicular, capaz de formar e estabilizar bioporos, o que melhora a estrutura do solo e promove maior aeração (SILVA et al., 2020). A maior proporção de macroporos favorece a difusão de oxigênio e a liberação de CO₂ do solo, resultantes da respiração microbiana e radicular, processos essenciais para a ciclagem de nutrientes e para a dinâmica da matéria orgânica (MOTA et al., 2021). Além disso, a diversificação de espécies em sistemas consorciados tende a intensificar a atividade biológica e aumentar a conectividade dos poros, refletindo em maior estabilidade estrutural em plantio direto (TAVARES FILHO & TESSIER, 2019).

Para Sorgo + Crotalária, a resistência à penetração é significativamente menor em profundidades de até 30 cm em comparação com Sorgo e Sorgo + *Urochloa*. Crotalária é conhecida por suas propriedades de fixação de nitrogênio e por melhorar a porosidade do solo (PITOL, 2008; SILVA ET AL., 2011). Sua rápida decomposição e contribuição para a matéria orgânica são fatores que podem explicar a menor resistência à penetração observada (MELO ET AL., 2017). A diversidade dos sistemas radiculares e as diferentes taxas de decomposição podem ter contribuído para uma maior macroporosidade e uma estrutura do solo mais solta (SILVA ET AL., 2021). Essa combinação maximiza os benefícios individuais de cada cultura de cobertura, proporcionando uma melhoria mais substancial na saúde do solo (FERREIRA ET AL., 2021).

Estudos recentes apontam que sistemas com cobertura vegetal mais diversificada intensificam os processos de respiração microbiana e decomposição da matéria orgânica, resultando em maiores emissões de CO₂ para a atmosfera (SADEGHPOUR ET AL., 2022). Além disso, sistemas consorciados com leguminosas e gramíneas tropicais, como crotalária e *Urochloa*, promovem o acúmulo de carbono decomposto e a mineralização mais intensa do solo, conforme evidenciado por (BHATTARAI ET AL., 2023), que observaram aumento significativo nas frações de carbono lábil e mineral associado em resposta ao consórcio entre culturas. Por fim, (LIU ET AL., 2020) demonstraram que a inclusão de plantas de cobertura em sistemas tropicais promove a melhoria do estoque de carbono orgânico do solo e aumenta a liberação de CO₂ em função da maior biomassa microbiana ativa, sem comprometer o balanço líquido de carbono.

Em sistemas integrados com cobertura vegetal e adubação nitrogenada (como ureia), a redução da temperatura do solo pode melhorar significativamente a eficiência do fertilizante. De acordo com (DINIZ ET AL.,2025), temperaturas elevadas (entre 25 e 35 °C) favorecem a volatilização de amônia e a desnitrificação microbiana.

Os resultados da PCA demonstram que diferentes arranjos de cultivo influenciaram de maneira distinta os atributos biológicos e físicos do solo, refletindo a complexidade das interações entre plantas de cobertura e comunidades edáficas. A associação do sistema sem consórcio com variáveis microbiológicas e de respiração sugere maior atividade microbiana intensiva, o que pode estar relacionado ao acúmulo de resíduos mais facilmente decomponíveis nesse manejo. Contudo, essa intensificação nem sempre implica maior sustentabilidade, pois pode levar à rápida mineralização da matéria orgânica e menor aporte estrutural ao solo (BARDGETT & VAN DER PUTTEN, 2014).

Por outro lado, a proximidade do sorgo+cr com atributos físicos, como resistência à penetração e estabilidade de agregados, evidencia que a presença da crotalária contribuiu para melhorias estruturais, possivelmente pela maior quantidade e diversidade de raízes, bem como pela maior produção de biomassa, fatores reconhecidos por favorecer a agregação e a estabilidade do solo (SIX et al., 2004). O tratamento sorgo+u apresentou forte relação com atributos microbianos e respiratórios, o que sugere que a presença de sorgo isoladamente estimulou o metabolismo microbiano. No entanto, a ausência de leguminosa nesse arranjo pode ter limitado a diversificação dos nichos biológicos, restringindo benefícios ecológicos mais amplos (LEHMANN et al., 2020).

Por fim, o agrupamento do sorgo+u+cr em associação direta com a macrofauna indica que a combinação entre sorgo e crotalária proporcionou condições mais favoráveis ao desenvolvimento de organismos de maior porte, fundamentais para a manutenção da estrutura e da ciclagem de nutrientes no solo. Esse resultado corrobora evidências de que sistemas diversificados promovem maior estabilidade biológica e funcionam como ambientes resilientes, devido à complementaridade de efeitos radiculares e qualidade dos resíduos (LAVELLE et al., 2006).

5. CONCLUSÃO

Os sistemas de cultivo influenciaram significativamente os atributos físicos e biológicos do solo. O consórcio de sorgo com crotalária reduziu a densidade e a resistência à penetração, além de aumentar a macroporosidade. O monocultivo de sorgo apresentou piores condições físicas e menor atividade biológica. Sistemas com espécies de cobertura favoreceram maior atividade microbiana, emissão de CO₂ e diversidade da macrofauna. O uso consorciado de sorgo e crotalária mostrou maior eficiência para a conservação e qualidade do solo. A integração de culturas constitui prática de manejo sustentável com potencial para melhorar a resiliência dos sistemas agrícolas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATKIN, O. K.; EDWARDS, E. J.; LOVEYS, B. R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. **New Phytologist**, v. 147, n. 1, p. 141–154, 2000.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H.; YOKOYAMA, A.H. Contribution of roots and shoots of Brachiaria species to soybean performance in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.592-598, 2017.

BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. (2014). *Belowground biodiversity and ecosystem functioning*. **Nature**, 515, 505–511. doi:10.1038/nature13855

BASCHE, A. D., KASPAR, T. C., ARCHONTOULIS, S. V., JAYNES, D. B., SAUER, T. J., PARKIN, T. B., & MIGUEZ, F. E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. **Agricultural Water Management**, 172, 40–50.

BASCHE, A. D., MIGUEZ, F. E., KASPAR, T. C., & CASTELLANO, M. J. (2014). Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. **Journal of Soil and Water Conservation**, 69(6), 471-482.

BHATTARAI, R. et al. Carbon input-driven mechanisms for the formation of mineral-associated organic matter in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v. 230, 105704, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105704>.

BLANCO-CANQUI, H., & RUIS, S. J. (2020). Cover crops and soil health. **Soil and Tillage Research**, 198, 104558.

BLANCO-CANQUI, H., LAL, R., POST, W. M., IZAURRALDE, R. C., & OWENS, L. B. (2022). Soil mechanical properties and organic carbon dynamics as influenced by cropping systems. **Soil and Tillage Research**, 221, 105360.

BLANCO-CANQUI, H., RUIS, S. J., & WORTMANN, C. S. (2023). Effects of cover crops on soil physical properties: A comprehensive review. **Soil and Tillage Research**, 230, 105715. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105715>

BORGES, J.A.R., PIRESA, L.F., CASSAROA, F.A.M., WALDIR, L.R., HECKC, R.J., ROSAD, J.A., WOLFE, F.G., 2018. X-ray microtomography analysis of representative elementary volume (REV) of soil morphological and geometrical properties. **Soil & Tillage Research**. 182, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.004>.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.605–614, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400001>.

CARVALHO, A. M., SOUZA, J. P., GUIMARÃES JÚNIOR, R., & ALVES, P. C. A. C. (2017). Plantas de cobertura e manejo da palhada no sistema plantio direto. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, DF.

CERCIOGLU, M., ANDERSON, S. H., UDAWATTA, R. P., & ALAGELE, S. (2018). Effects of cover crops on the soil water dynamics and pore size distribution in a claypan soil. **Geoderma**, 319, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.001>

CERETTA C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. Tópicos ciência do solo. Viçosa: **Editora Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.49-134.

CHEN, L., ZHANG, Y., YANG, Q., & WANG, J. (2023). Soil pore structure regulates carbon dynamics under different cropping systems. **Soil & Tillage Research**, 228, 105615. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105615>

COSTA, N. R. ET AL. Efeito de plantas de cobertura nas propriedades físicas do solo em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 44, e0200044, 2020.

CRUSCIOL, C. A. C., LIMA, E. V., ANDREOTTI, M., MORO, E., & VENÂNCIO, R. S. (2010). Persistência de palhada e liberação de nutrientes do sorgo granífero, milho e Urochloa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 45(5), 516-520.

CRUSCIOL, C. A. C., MOMESSO, L., PORTUGAL, J. R., ET AL. (2021). Upland rice intercropped with forage grasses in an integrated crop-livestock system: optimizing nitrogen management and food production. **Field Crop Research**, 261, 108008. doi: 10.1016/j.fcr.2020.108008

CRUSCIOL, C. A. C., SORATTO, R. P., MATEUS, G. P., COSTA, C. H. M., & PARIZ, C. M. (2013). Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. **Agronomy Journal**, 105(5), 1437-1445.

DA SILVA, R. F., DA COSTA SEVERIANO, E., DE OLIVEIRA, G. C., ET AL. (2021). Changes in soil profile hydraulic properties and porosity as affected by deep tillage soil preparation and Brachiaria grass intercropping in a recent coffee plantation on a naturally dense Inceptisol. **Soil & Tillage Research**, 213, 105127. doi: 10.1016/j.still.2021.105127

DAS, A. (2024). Symmetry and symmetry-breaking in soil pores and climate change mitigation: What fractal geometry can tell us? **arXiv**. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.14217>

DESALEGN, T., MEKONNEN, T., GETACHEW, S., & LEMMA, T. (2023). Impacts of Cover Crops on Soil Health and Crop Productivity: A Review. **Soil and Tillage Research**, 223, 105345.

DEXTER, A. R., RICHARD, G., ARROUAYS, D., CZYŻ, E. A., JOLIVET, C., & DUVAL, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**, 144(3-4), 620–627. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.022>

DINIZ, C. M. R. et al. Temperature sensitivity and urea biochemical transformations in Cerrado soils. **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, p. 1498282, 2025.

DRESCHER, M.S. Estratégias para descompactação do solo por escarificação e hastes sulcadoras em sistema plantio direto. 2015. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - **Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria**, 2015.

FERREIRA, A. C., COSTA, A. R., SILVA, M. A., & GOMES, L. C. (2021). Benefits of *Crotalaria juncea* as a cover crop in tropical soils. **Soil and Tillage Research**, 213, 105122.

FERREIRA, A. C., COSTA, A. R., SILVA, M. A., & GOMES, L. C. (2021). Benefits of *Crotalaria juncea* as a cover crop in tropical soils. **Soil and Tillage Research**, 213, 105122.

FERREIRA, C. J. B., SILVA, A. P., SANTOS, D. C., ET AL. (2023). Cover crops improve physical quality of a compacted tropical soil under no-tillage. **Agronomy**, 13(1), 79. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010079>

FERREIRA, L. L., SOUZA, B. R., PEREIRA, A. I. A., CURVÊLO, C. R. S., FERNANDES, C. S., DIAS, N. S., & NASCIMENTO, E. K. Á. (2019). Bioestimulante e nitrogênio de liberação gradual no desempenho do sorgo. **Nativa**, 7(4), 330-335. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i4.6656>.

GENTSCH, N., ET AL. (2020). Increased root biomass through cover crop mixtures enhances soil biogeochemical cycling. **Agricultural Systems**, 182, 102839.

GILBERT, R. A., MORSE, S., ROBERTS, C. A., & ZARTMAN, R. E. (2008). Evaluation of leguminous cover crops for weed suppression and soil fertility improvement. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(3), 183-190.

GOUJOU-LIAS, M. et al. Soil organic carbon and physical properties influenced by cover crop management in tropical soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 103, n. 4, p. 935–950, 2023. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cjss-2023-0095>

GUÉVARA, M. et al. Soil respiration signals in response to sustainable soil management practices enhance soil organic carbon stocks. **arXiv preprint arXiv:2404.05737**, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2404.05737>

HAMZA, M. A., & ANDERSON, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, 82(2), 121-145.

HARUNA, B., ANDERSON, S., GANTZER, C., & ALBERTS, E. (2020). Improving soil physical properties through the use of cover crops: A review. **Agrosystems, Geosciences & Environment**. <https://doi.org/10.1002/agg2.20005>

HASKEL, M.K. Atributos físicos do solo conduzido sob escarificação mecânica, biológica e plantio direto: influência na produtividade biológica das culturas. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Departamento Acadêmico de Ciências Agrárias, **Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco**, 2020.

HELLNER, Q., KOESTEL, J., UL'EN, B., LARSBO, M., 2018. Effects of tillage and liming on macropore networks derived from X-ray tomography images of a silty clay soil. **Soil Use Manage.** 34, 197–205. <https://doi.org/10.1111/sum.12418>.

HUDEK, C., ET AL. (2022). Root traits of cover crops for soil health improvement. **Soil Biology and Biochemistry**, 157, 108265.

JABRO, J. D., IVERSEN, W. M., & EVANS, R. G. (2022). Impact of cover crops and tillage on selected soil physical properties in semi-arid conditions. **Soil Science Society of America Journal**, 86(3), 489–500. <https://doi.org/10.1002/saj2.20645>.

KELLER, T., SANDIN, M., COLOMBI, T., HORN, R., & OR, D. (2022). Historical and future perspectives of soil compaction research: From foot marks to modern agriculture. **Soil and Tillage Research**, 218, 105234.

LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F.; MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, 42, S3–S15. doi:10.1016/j.ejsobi.2006.10.002

LI, Y., LI, Z., CUI, S., JAGADAMMA, S., ZHANG, Q., 2019. Residue retention and minimum tillage improve physicalthe physical environment of the soil in croplands: A global meta - analysis. **Soil Tillage Res.** 194, 104292 <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.009>.

LI, Y., WANG, Z., LI, J., ZHANG, X., & CHEN, Y. (2024). Effects of intercropping on soil greenhouse gas emissions: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, 907, 167750.

Liu, S., Qin, W., & Oenema, O. (2022). Soil compaction and crop production: A meta-analysis. **Soil Use and Management**, 38(2), 276-288.

LIU, X. et al. Cover crops improve soil organic carbon and microbial biomass but not aggregate stability in the short term. **Science of The Total Environment**, v. 722, 137868, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137868>.

LIU, Y., ZHANG, H., & HUANG, J. (2024). Intercropping effects on soil CO₂ emissions and carbon sequestration: A systematic review and meta-analysis. **Environmental Pollution**, 341, 123015.

MANGALASSERY, S., SJÖGERSTEN, S., SPARKES, D. L., STURROCK, C. J., & MOONEY, S. J. (2019). The effect of soil structure and pore morphology on carbon dynamics in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 130, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.12.012>.

MARTIN-GUAY, M. O.; PAQUETTE, A.; DUPRAS, J.; RIVEST, D. The new Green Revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping. **Science of the Total Environment**, v. 615, n. 1, p. 767-772, 2018.

MELO, W. J., PEREIRA, M. G., & PAVINATO, P. S. (2017). The role of *Crotalaria juncea* in soil nitrogen fixation and organic matter enhancement. **Agricultural Research**, 6(2), 126-134.

MELO, W. J., PEREIRA, M. G., & PAVINATO, P. S. (2017). The role of *Crotalaria juncea* in soil nitrogen fixation and organic matter enhancement. **Agricultural Research**, 6(2), 126-134.

MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R. Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. In: TIECHER, T. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p.34-48.

MOTA, J. C. A., SOUSA, D. M. G., SILVA, F. C., & CUNHA, T. J. F. (2021). Soil structure and gas exchange in cropping systems with cover crops. **Geoderma**, 386, 114911. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114911>

PACHECO, L. P., MONTEIRO, M. M. S., SILVA, A. F., PETTER, F. A., & CARVALHO, M. C. S. (2011). Desempenho de plantas de cobertura em função do manejo do solo e da adubação nitrogenada no cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35(5), 2031-2039.

PIRES, L. F., BORGES, J. A. R., ROSA, J. A., & MOONEY, S. J. (2023). Soil compaction in Brazil: Current status and future approaches for mitigation. **Soil and Tillage Research**, 234, 105411.

POSSAMAI, E.J.; CONCEIÇÃO, P.C.; AMADORI, C.; BARTZ M.L.C.; RALISCH, R.; VICENSI, M.; MARX, E.F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: a (re)

view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.46, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210104>.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: RUFFATO, G.G.; SECCO, D.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; TOKURA, L.K.; MARINS, A.C.; VILLA, B.D.; NASCIMENTO, L.F.J. Structuring of a haplortox by cover crops and their effects on the yield of soybean grains. **Journal of Agircultural Science**, v.11, n.5, p.309-313, 2019. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p309>.

SADEGHPOUR, A. et al. Carbon dioxide efflux in forage sorghum cropping systems with different cover crops. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 3, p. 1175–1186, 2022. <https://doi.org/10.1002/agj2.21035>.

SANTOS, G. G.; Silveira, P. M.; MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BALBINO, L. C. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um latossolo vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.115-122, 2018.

SHAHEB, M. R. A study on the effect of tyre inflation pressure on soil properties, growth and yield of maize and soybean in Central Illinois. 2020. Ph.D. (Thesis) - **Harper Adams University, Newport, United Kingdom**, 2020.

SILVA, A. R. DA ET AL. Plantas de cobertura e seus efeitos na qualidade física do solo em sistema de plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 43, e52390, 2021.

SILVA, F. F., MARCHÃO, R. L., SIMÕES, R. A., MACIEL, G. A., & CARVALHO, A. M. (2019). Soil organic carbon and physical attributes in sorghum and *Urochloa ruziziensis* intercrops under no-tillage in the Brazilian Cerrado. **Bragantia**, 78(4), 1–10.

SILVA, M. A. DA, OLIVEIRA, T. S., & MEDEIROS, E. V. (2020). Soil physical quality and pore distribution under different cover crops in no-tillage system. **Soil & Tillage Research**, 196, 104442. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104442>

SILVA, R. F., MURAOKA, T., BUZETTI, S., TRIVELIN, P. C. O., & OLIVEIRA, R. (2011). Nitrogen fertilization and cover crops affecting soil attributes and productivity of an upland rice-cowpea rotation. **Scientia Agricola**, 68(4), 478-484.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, 79, 7–31. doi:10.1016/j.still.2004.03.008

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Cerrado Correção e Adubação. **Embrapa**. 2004

SOUZA, H. M. ET AL. Atributos físicos e produtividade de milho em sistemas de manejo com plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 17, e024013, 2023.

SULZBACH, L.G.; SECCO, D.; TOKURA, L.K.; DE VILLA, B.; RUFFATO; G.G. Implicações de espécies de cobertura em parâmetros físico-hídricos de um Latossolo argiloso e no rendimento de grãos de soja. **Acta Iguazu**, v.6, n.5, p.280-286, 2017.

TAVARES FILHO, J., & TESSIER, D. (2019). Soil pore system changes under different soil management practices. **Soil Research**, 57(2), 133-141. <https://doi.org/10.1071/SR18207>

TEIXEIRA, P.C; DONAGEMMA, G.K; FONTANA, A; TEIXEIRA, W.G. Manual de métodos de análise de solo - 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: **Embrapa**, 2017. 573 p.

VALICHESKI, R.R.; GROSSKLAUS, F; STÜRMER, S.L.K; TRAMONTIN, A.L.; BAADE, E.S.A.S Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.969-977, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900007>.

VYTAUTAS MAGNUS UNIVERSITY. (2019). Soil water capacity, pore size distribution, and CO₂ emission in different soil tillage systems. **Environmental Science and Pollution Research**, 26(10), 10123–10135. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04457-0>

XU, L.; BALDOCCHI, D. D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 1, 2004.

ZHANG, X., MILLER, L., & SCHMIDT, J. (2021). Soil pore size distribution and its effect on microbial carbon stabilization. **Soil Ecology Letters**, 3, 35–47. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0077-0>

ZHOU, X., GOWDA, P. H., MAREK, T. H., & HOWELL, T. A. (2022). Carbon fluxes and water use efficiency of sorghum and maize under semi-arid conditions. **Land**, 11(2), 309. <https://doi.org/10.3390/land11020309>.

ŽIŪRAITIS, G., RUDINSKIENĖ, A., JACKEVIČIENĖ, K., & BOGUŽAS, V. (2024). "Long-Term Effects of Different Tillage Systems and Their Impact on Soil Properties and Crop Yields." **Agronomy**, 14(4), 870.