

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS
AGRONÔMICAS DA SOJA EM SISTEMAS DE SUCESSÃO E
ROTAÇÃO DE CULTURAS**

GABRIEL LUIZ PIATI

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2022**

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS
AGRONÔMICAS DA SOJA EM SISTEMAS DE SUCESSÃO E
ROTAÇÃO DE CULTURAS**

GABRIEL LUIZ PIATI

Engenheiro Agrônomo, Mestre em Produção Vegetal

Orientador: PROF. DR. LUIZ CARLOS FERREIRA DE SOUZA

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

**Dourados
Mato Grosso do Sul
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

P582a	<p>Piati, Gabriel Luiz.</p> <p>Atributos físicos do solo e características agronômicas da soja em sistemas de sucessão e rotação de culturas. / Gabriel Luiz Piati. – Dourados, MS : UFGD, 2022.</p> <p>Orientador: Luiz Carlos Ferreira de Souza.</p> <p>Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados.</p> <p>1. Sistema de plantio direto. 2. Física do solo. 3. <i>Glycine max</i> (L) Merrill. I. Título.</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

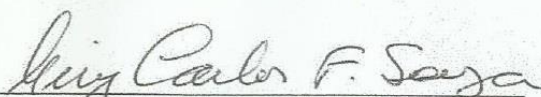
"Atributos físicos do solo e características agronômicas da soja em sistemas de sucessão e rotação de culturas"

por

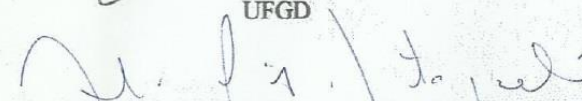
GABRIEL LUIZ PIATI

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM AGRONOMIA

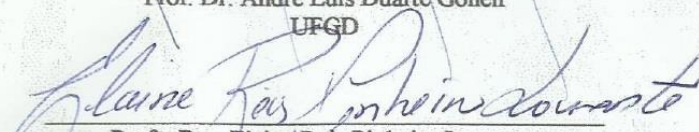
Aprovada em: 25/02/2022



Profa. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza
UFGD



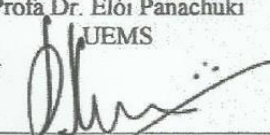
Prof. Dr. André Luis Duarte Goneli
UFGD



Profa. Dra. Elaine Reis Pinheiro Lourente
UFGD

ELOI Assinado de forma digital por ELOI
PANACHUKI:52907040'97 PANACHUKI:52907040'97
Dados: 2022.05.10 17:55:06 -03'00'

Profa. Dr. Elói Panachuki
UEMS



Prof. Dr. Júlio Cesar Salton
EMBRAPA - CPAO

Aos meus pais, Jaci Luiz Piati (in memoriam) e Lucia Ivete Rothenbach

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida que tem me concedido, e por sempre iluminar os meus passos com a intercessão de Nossa Senhora.

À Universidade Federal da Grande Dourados e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade da realização do curso de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza, pela convivência, por toda orientação, confiança, paciência, oportunidades, incentivos e conselhos que me foram dados durante a curso de doutorado.

Aos meus pais Jaci Luiz Piati (in memoriam) e Lucia Ivete Rothenbach e a minha irmã Angélica Luiza Piati que sempre me deram apoio, incentivo e confiança.

À minha noiva Ana Rúbia Monteiro pelo apoio e companheirismo a cada dia.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pelo conhecimento transmitido.

Aos colegas de pós-graduação pelo incentivo e apoio durante o curso.

Aos amigos Jucimar Ferreira Neves, Wander Valin, Alves Alexandre Alovise, Diandra Della Flora, Felipe Cardoso, Natanael Soares pelo auxílio na condução do experimento, na coleta de dados e pela amizade.

Aos funcionários da Fazenda Experimental da UFGD, que auxiliaram no trabalho de campo.

Aos membros das bancas de qualificação, pré-defesa e defesa pelas valiosas contribuições.

Muito Obrigado!!!

SUMÁRIO

RESUMO.....	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Sistema plantio direto.....	15
2.2. Espécies vegetais para rotação e cobertura do solo em sistema plantio direto	17
2.3. Atributos físicos do solo em sistema plantio direto	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Local do experimento e descrição edafoclimática	23
3.2. Delineamento experimental e tratamentos	26
3.3. Instalação e condução.....	28
3.3.1. Culturas de cobertura e sucessão	28
3.3.2. Cultura da soja	28
3.4. Amostragens e avaliações	29
3.4.1. Culturas de cobertura, sucessão e palhada em pré-semeadura da soja	29
3.4.2. Atributos físicos e matéria orgânica do solo	30
3.4.3. Componentes de produção da soja.....	30
3.5. Análise estatística.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Biomassa seca da parte aérea de plantas de cobertura	33
4.2. Palhada em pré-semeadura da soja.....	35
4.3. Atributos físicos do solo.....	37
4.4. Características agronômicas da soja.....	46
5. CONCLUSÕES.....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1. Textura do solo da área experimental da FAECA, UFGD. Dourados, MS, 2018.....	23
Quadro 2. Caracterização química do solo da área experimental amostrado na camada de 0-20 cm em outubro de 2018. Dourados, MS.....	23
Quadro 3. Sequência de tratamentos no experimento de sucessão e rotação de culturas, entre os anos de 2016 a 2020. Tratamentos 1 e 2 são sucessões, tratamentos 3,4,5 e 6 são rotações em parcelas duplicadas, no qual foram avaliadas as parcelas destacadas em negrito.....	27
Quadro 4. Valores médios da biomassa seca da parte aérea do milho e das culturas de cobertura. Dourados, MS, safra inverno 2018 e 2019	33
Quadro 5. Palhada sobre o solo coletada em pré-semeadura da soja em sistemas de sucessão e rotação de culturas nas safras 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS	35
Quadro 6. Macroporosidade do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.....	38
Quadro 7. Microporosidade do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.....	40
Quadro 8. Porosidade Total do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.....	41
Quadro 9. Densidade do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.	42
Quadro 10. Resistência do solo à penetração em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.....	43
Quadro 11. . Diâmetro médio geométrico (DMG) e matéria orgânica (MO) em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20 cm de profundidade avaliadas em 2018. Dourados, MS.....	45
Quadro 12. Altura de plantas (AP) e altura da inserção da primeira vagem (AIPV) de soja em sistemas de sucessões e rotações de culturas, safras 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.....	47

Quadro 13. Número de vagens (NV) e massa de 1000 grãos (M1000) de soja em sistemas de sucessões e rotações de culturas, safra 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.....48

Quadro 14. Produtividade de grãos de soja em sistemas de sucessões e rotações de culturas, safra 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.....49

LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1. Imagem aérea da área experimental, localizada na fazenda experimental de ciências agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, MS..... 23
- Figura 2. Temperaturas máximas e mínimas (°C) e precipitação no período de 90 dias após a semeadura das plantas de cobertura em 2018 e 2019. Dourados, MS.25
- Figura 3. Temperaturas máximas e mínimas (°C) e precipitação no período de 120 dias após a semeadura da soja safra 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.....25

PIATI, G. L. **Atributos físicos do solo e características agronômicas da soja em sistemas de sucessão e rotação de culturas.** 65 f. Tese (doutorado em agronomia, produção Vegetal). Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, 2021.

RESUMO

Dentre os desafios da agricultura atual, tem se tornado cada vez mais necessário a identificação de sistemas de manejo que preservem e melhorem os atributos físicos do solo, aliado a altas produtividades. Este trabalho teve como objetivo avaliar sistemas de sucessão e rotação de culturas quanto à produção de palhada e biomassa de espécies cultivadas no outono/inverno, aos atributos físicos do solo e quanto às características agronômicas da soja. O experimento foi composto por oito tratamentos, através de três sistemas de sucessão (soja/pousio, soja/milho e soja/milho+braquiária) e cinco sistemas de rotações de culturas no período de inverno (milheto, milheto + *Crotalaria ochroleuca*, aveia branca, ervilhaca e nabo forrageiro). O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições. Em 2018 e 2019 foram avaliadas a produção de biomassa seca e o respectivo resíduo (palhada) deixado no solo em cada sistema e as características agronômicas da soja nas safras 2018/19 e 2019/20. A macroporosidade; microporosidade; porosidade total; densidade do solo e resistência do solo à penetração foram avaliados nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm em pré-semeadura da soja na safra 2018/19. As avaliações referentes a agregação do solo, diâmetro médio geométrico e matéria orgânica foram realizadas somente nas camadas de 0-10 e 10-20 cm na safra 2018/19. Dentre os sistemas estudados, o consórcio entre milho e braquiária foi destaque nas safras 2018/19 e 2019/20, produzindo as maiores quantidades de biomassa seca da parte aérea. As maiores quantidades de palhada em pré-semeadura da soja foram encontradas nos sistemas de rotação com o cultivo de milheto + *C. Ochroleuca* na safra 2018/19, e na sucessão soja/milho+braquiaria e rotações com ervilhaca e nabo forrageiro na safra 2019/20. Os maiores níveis de macroporosidade, porosidade total e menores valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração foram encontrados nos sistemas de sucessão soja/milho+braquiaria e nos tratamentos que envolveram as rotações de culturas. Com exceção da soja em monocultivo, todos os sistemas de rotação ou sucessão de cultivos influenciaram no aumento dos teores de matéria orgânica do solo e consequente melhor estado de agregação do solo. As maiores produtividades de soja foram obtidas nos tratamentos que envolveram as rotações de culturas.

Palavras-chave: sistema plantio direto, física do solo, *Glycine max* (L) Merrill.

PIATI, G. L. **Soil physical attributes and agronomic characteristics of soybean in crop succession and rotation systems**. 65 f. Thesis (PhD in Agronomy- Plant production). Faculty of Agricultural Sciences (FCA), Federal University of Grande Dourados, Dourados-MS, 2021.

ABSTRACT

Among the challenges of current agriculture, it has become increasingly necessary to identify management systems that preserve and improve the physical attributes of the soil, combined with high productivity. This study aimed to evaluate crop succession and rotation systems regarding the production of straw and biomass of species cultivated in autumn/winter, the physical attributes of the soil and the agronomic characteristics of soybean. The experiment consisted of eight treatments, using three succession systems (soybean/fallow, soybean/corn and soybean/corn+brachiaria) and five crop rotation systems in the winter period (millet, millet + *Crotalaria ochroleuca*, white oat, vetch and forage radish). The experimental design was randomized blocks with four replications. In 2018 and 2019, the production of dry biomass and the respective residue (straw) left in the soil in each system and the agronomic characteristics of soybeans in the 2018/19 and 2019/20 harvests were evaluated. The macroporosity; microporosity; total porosity; Soil density and soil penetration resistance were evaluated in layers 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 and 40-50 cm in soybean pre-sowing in the 2018/19 crop. The evaluations regarding soil aggregation, geometric mean diameter and organic matter were carried out only in the 0-10 and 10-20 cm layers in the 2018/19 harvest. Among the systems studied, the intercropping between corn and Brachiaria was highlighted in the 2018/19 and 2019/20 harvests, producing the highest amounts of dry biomass of the aerial part. The highest amounts of straw in soybean pre-sowing were found in the rotation systems with the cultivation of millet + *C. ochroleuca* in the 2018/19 harvest, and in the soybean/corn+brachiaria succession and rotations with vetch and forage radish in the harvest 2019/20. The highest levels of macroporosity, total porosity and lowest values of soil density and soil penetration resistance were found in the soybean/corn+brachiaria succession systems and in the treatments that involved crop rotations. With the exception of soybean in monoculture, all crop rotation or succession systems influenced the increase in soil organic matter contents and, consequently, a better state of soil aggregation. The highest soybean yields were obtained in treatments that involved crop rotations.

Keywords: no-till, soil physics, *Glycine max* (L) Merrill.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca entre os maiores produtores mundiais de grãos, na quarta colocação, atrás apenas da China, Estados Unidos e da Índia, o Brasil é responsável por 7,8% da produção mundial com 254 milhões de toneladas de grãos produzidos em 2021. Com produção recorde de soja em 2021 (136 milhões de toneladas), o Brasil representou 50% do mercado global nesse mercado e ficou com o posto de segundo maior exportador de milho, junto, essas duas culturas representam a maior parte da quantidade produzida no país em 2021 (CONAB, 2022).

Em âmbito nacional, a região Centro-Oeste é a maior produtora de grãos, representando 46% de tudo o que é produzido, e concentra, principalmente a produção de milho safrinha (73%) e a produção nacional de soja (45%) (CONAB, 2020). Isso se deve principalmente a adoção do sistema de sucessão soja / milho safrinha na maior parte das áreas agrícolas, principalmente no Cerrado, safra após safra.

O sistema plantio direto (SPD) tem sido a prática de manejo conservacionista de maior importância para a sustentabilidade da agricultura não só no Brasil, mas também em âmbito global (LOPES; GUIMARÃES, 2016). Porém apesar do grande número de pesquisas e observações a campo, em grande parte das áreas, ainda existem algumas limitações iniciais relacionadas a prática do SPD.

A compactação do solo em SPD, pode ocorrer principalmente nos primeiros três a quatro anos do início do sistema, devido ao rearranjo natural das partículas sólidas e a pressão exercida pelo tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade do solo (BERGAMIN et al., 2010; GUBIANI et al., 2015). Outros estudos ainda apontam período que pode variar de 6 a 12 anos para a estabilização do SPD, em que há o início dos benefícios do sistema relacionados a qualidade física do solo, por exemplo, como a maior agregação e capacidade de retenção de água no solo (SÁ et al., 2019; POSSAMAI et al., 2022).

Outro fator que tem limitado a sustentabilidade do SPD no Brasil é a sua prática errônea, na maioria dos casos têm se observado a adoção do monocultivo e/ou sucessão de culturas soja e milho safrinha. Essas práticas de manejo tendem a ocasionar degradação física, química e biológica do solo, além de propiciar aumento na incidência e severidade de pragas, doenças e plantas daninhas nos sistemas de produção, tornando-o insustentável a longo prazo (SEDIYAMA, 2009; BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

Sabe-se que a diminuição das operações agrícolas não é suficiente na prevenção a compactação do solo, quando não é utilizada com práticas conservacionistas como a rotação de culturas pelo cultivo de espécies que produzam grande quantidade de biomassa vegetal e de sistema radicular profundo (JIMENEZ et al., 2008). Necessariamente, todo o processo de recuperação de áreas degradadas deve passar por um manejo adequado do solo norteado por princípios de mínima mobilização deste, procurando mantê-lo coberto o maior tempo possível e rotacionando com diferentes culturas (NUNES et al., 2017).

Trabalhos realizados em Latossolo Vermelho distroférico na região sul de Mato Grosso do Sul (BOTTEGA et al., 2011) e no norte do Paraná (FRANCHINI et al., 2011a), indicam a existência de camada compactada em SPD, principalmente localizadas na faixa de 10 a 20 cm de profundidade. Em sistemas plantio direto, a busca por um manejo que promova melhoria na estruturação e qualidade física do solo, necessariamente passa pela escolha de espécies vegetais que possam ser utilizadas em um programa de rotação de culturas. Para isso é primordial o estudo a campo de culturas que promovam aportes consideráveis de matéria orgânica no sistema e por consequência melhorias na estrutura, agregação, porosidade e retenção de água no solo.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos dos sistemas de sucessão e rotação de culturas na produção de palhada e biomassa das espécies cultivadas no outono/inverno, nos atributos físicos do solo e nas características agrônômicas da soja.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistema plantio direto

Durante a década de 1970, surgiam de forma isolada na região Sul do Brasil, diversos estudos que buscavam modificar técnicas de manejo visando proteger o ambiente e também manter a rentabilidade do sistema de produção agrícola. Em comum tais estudos, de forma pioneira, buscavam adaptar processos e tecnologias de produção agrícola em ambientes tropicais e semitropicais. Dessa forma houve o surgimento do sistema de plantio direto, devido ao esforço de vários setores sociais, impactando diretamente a evolução da agricultura brasileira (CASÃO JUNIOR et al., 2012).

O sistema de plantio direto representa um conjunto de práticas agrícolas baseadas em três premissas: cobertura permanente, revolvimento mínimo do solo e rotação de culturas (WARD et al., 2018), e estudos mostram que a longo prazo, os efeitos benéficos do SPD, são observados principalmente quando são adotados os três princípios conceituais desse sistema conservacionista. Porém, a utilização isolada de um dos componentes ou apenas dois torna o SPD insustentável ao longo do tempo (MUNKHOLM et al., 2013; KODZWA et al., 2020).

Atualmente, reconhecido pelo mundo como um sistema de produção agrícola ambientalmente correto e sustentável, o sistema plantio direto, vêm trazendo inúmeros benefícios para a agricultura brasileira, tais como, drástica redução das perdas de solo por erosão, melhor agregação e estrutura dos solos (MARIA et al., 2019). Também ocorre incremento em sua biodiversidade e atividade microbológica, aumento do potencial produtivo das culturas comerciais, além da redução dos custos de produção devido ao menor consumo de combustíveis, insumos e mão de obra comparados ao sistema de plantio convencional (MOTTER; ALMEIDA, 2015).

A ciclagem de nutrientes proporcionada pela rotação de culturas é considerada uma importante forma de gestão da fertilidade do solo no sistema de plantio direto, pois agrega na disponibilidade de nutrientes demandados pela cultura de interesse econômico. A dinâmica da ciclagem de nutrientes no SPD é altamente dependente das espécies vegetais utilizadas em rotação e das condições ambientais as quais estão inseridas, o que influencia a taxa de decomposição de seus resíduos (MARTINS, 2016).

Devido ao desenvolvimento radicular agressivo, as culturas de cobertura possuem boa capacidade de mobilização dos nutrientes das camadas mais profundas do solo,

disponibilizando os mesmos aos cultivos sucessivos. Entretanto, o acúmulo de nutrientes é extremamente dependente do rendimento da fitomassa seca da parte aérea, sendo importante levar em consideração o potencial de produção de palhada das espécies rotacionadas, principalmente em regiões tropicais, em que a decomposição é mais acelerada (PISSINATI et al., 2016).

O uso de gramíneas no sistema de produção traz maior persistência da palhada sobre o solo no SPD, devido a maior relação C/N, tornando extremamente vantajoso sua utilização na rotação de culturas (RAIESI; KABIRI, 2016, VASU et al., 2016). Entretanto, o processo de decomposição dos resíduos das gramíneas imobiliza consideráveis quantidades de nutrientes do solo, principalmente N (ANDERSON, 2016) e a taxa de mineralização de espécies pertencentes a essa família é mais lenta comparada às leguminosas, que além do benefício da fixação biológica do N em associação com bactérias diazotróficas, essas também possuem maior capacidade na rápida disponibilização dos nutrientes para as culturas subsequentes (MENDONÇA et al., 2017). Portanto, no planejamento de um programa de rotação de culturas em SPD, deve-se levar em consideração, cronologicamente, o cultivo intercalado de gramíneas e leguminosas e/ou até mesmo a associação simultânea de espécies de ambas as famílias, visando buscar maior taxa de mineralização dos nutrientes com maior aporte de matéria orgânica no sistema (RODRIGUES et al., 2012).

A microbiota do solo está entre os fatores que exercem forte influência do sistema de manejo adotado, desempenhando importante papel na ciclagem de nutrientes e na decomposição dos resíduos vegetais (GONÇALVES et al., 2019). Segundo Cardoso et al. (2013), os indicadores microbianos são mais susceptíveis que os atributos químicos e físicos do solo, às mudanças do meio, por isso qualquer estratégia de manejo conservacionista que agregue em melhor qualidade microbiológica do solo é capaz de resultar em produtividade das culturas.

O SPD vem agregando significativamente na microbiota do solo a medida em que se consolida no sistema de produção, a manutenção da palhada em superfície, origina camadas de resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, propiciando um microclima favorável ao desenvolvimento dos microrganismos (SILVA, et al., 2012).

Significativas alterações na dinâmica de nutrientes nos sistemas de produção vêm sendo observadas com a adoção em massa do SPD pelos agricultores. A continua adubação na linha de semeadura, associado ao revolvimento mínimo do solo, contribui para a melhor absorção e acúmulo de nutrientes no tecido das plantas e sua liberação ao

longo do tempo, aumentando os teores de nutrientes, principalmente Ca, Mg, K e P nas camadas superficiais do solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; NEUGSCHWANDTNER et al., 2014).

A adição e manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo que ocorre em SPD, proporciona melhorias nos atributos químicos do solo, havendo maior adsorção de H e Al, em superfície, ocasionando elevação do pH, complexação do Al por compostos orgânicos, troca de ligantes entre os grupos funcionais hidroxilas dos oxihidróxidos de Fe e Al e os ânions orgânicos, além do aumento do potencial de oxidação biológica de ânions orgânicos (FRANCHINI et al., 2003).

A matéria orgânica proveniente da decomposição da palhada em SPD, possibilita uma racionalização do adubo mineral, aumento da capacidade de troca catiônica e redução de perdas de nutrientes por lixiviação (ALVES et al., 2021), a exemplo do potássio que fica mais adsorvido nos sítios de troca do solo, sendo menos lixiviado em sistemas em que há alto aporte de resíduos orgânicos (GARCIA et al., 2015).

O aporte contínuo de matéria orgânica e a manutenção de resíduos vegetais em SPD, criam um ambiente no solo de elevada produção de compostos orgânicos, como, substâncias húmicas, ácido tânico, aminas, compostos aromáticos, ácidos orgânicos de baixa massa molecular que aumentam na medida em que se eleva a adição de palhada no sistema, produzindo contínuos efeitos positivos em sua fertilidade (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Andrioli e Prado (2012) observaram aumento nos teores de matéria orgânica do solo de 17 para 23 g kg⁻¹ na camada superficial de solos cultivados em sistema de plantio convencional na comparação com a semeadura direta com utilização de diferentes culturas em rotação. Junto ao aumento da matéria orgânica, os autores constataram aumento do pH, redução nos teores de alumínio e incremento nos teores de nutrientes catiônicos com maiores quantidades de Ca e Mg em solos cultivados com crotalária e K em solos com o cultivo de milho.

2.2. Espécies vegetais para rotação e cobertura do solo em sistema plantio direto

Um sistema produtivo sustentável deve ter como premissa básica o equilíbrio entre as plantas, solos, nutrientes, luminosidade e demais organismos coexistentes. Tais condições de equilíbrio, são dependentes de um ambiente rico em biodiversidade associado ao agroecossistema, e a utilização das plantas de cobertura cultivadas em

rotação em um sistema de produção exercem fundamental importância nesse quesito (ANGELETTI et al., 2018).

Dentre as culturas de cobertura, as espécies pertencentes a família fabaceae (leguminosas), são utilizadas nos sistemas, principalmente devido ao fornecimento de nitrogênio às culturas subsequentes, pois realizam simbiose com bactérias fixadoras desse elemento na forma atmosférica (CANALLI; BORDIN, 2019). Por outro lado, as poaceae (gramíneas) e crucíferas tem caráter mais voltado a fornecimento de proteção e cobertura ao solo por maiores períodos de tempo, devido à alta relação carbono / nitrogênio (CANALLI et al., 2019).

Principalmente devido a questões econômicas e ambientais, grande parte dos agricultores brasileiros da região Centro-Sul têm adotado o cultivo do milho de segunda safra ou safrinha no outono/inverno em um sistema sucessivo com a soja sendo cultivada na safra verão. Segundo Cruz et al. (2010), o milho safrinha tem sua produtividade bastante afetada devido a época em que é cultivado, principalmente pelo escasso regime pluvial e limitações de radiação solar e baixas temperaturas, a depender da região, na fase final de seu ciclo.

Além da redução do teto produtivo, o milho quando cultivado no outono/inverno, desfavorece o aporte de matéria orgânica no solo devido à baixa produção de massa seca comparado ao milho cultivado no verão (FRANCHINI et al., 2011b). Portanto, os estudos referentes a espécies que possam ser utilizadas como opções de maior viabilidade para cultivo no outono/inverno são de fundamental importância, sobre as perspectivas econômicas e agrônômicas para os sistemas de produção agrícola.

Com o objetivo de aumentar a diversificação de espécies utilizadas nos sistemas agrícolas, manter a rentabilidade com a produção de grãos e aumentar o aporte e palhada no SPD, os agricultores vêm adotando na safrinha o cultivo simultâneo de milho com braquiárias em sucessão a soja na safra verão. Nesse sistema, a ocupação, cobertura e proteção da área é maior e mais duradoura, pois a braquiária tem contínuo desenvolvimento após a colheita do milho safrinha, fornecendo palhada em grande quantidade, podendo chegar a 16 Mg ha⁻¹ no momento da semeadura da soja (SALTON et al., 2012).

A introdução de forrageiras no SPD favorece o desempenho das culturas utilizadas em sucessão pelo melhor enraizamento das mesmas, devido ao aporte de matéria orgânica, que dentre os benefícios, melhora as condições químicas, físicas e biológicas

do solo e possibilita ganhos em produtividade na cultura da soja (MENDONÇA et al., 2015).

Além do consórcio de milho com braquiária, como uma alternativa para o sistema de rotação, fornecendo maior quantidade e qualidade de fitomassa, também vêm sendo adotado o cultivo consorciado entre gramíneas e leguminosas. A exemplo o consórcio milho e crotalária, que fornece palhada em quantidades adequadas (acima de 6 Mg ha⁻¹) e com maior persistência sobre o solo, além de favorecer a ciclagem de nutrientes como nitrogênio e potássio para as culturas em sucessão (CAZETTA et al., 2005; ALVARENGA et al., 2006).

Silva et al. (2010) estudando as culturas do milho e *Crotalaria juncea* L., em cultivo solteiro e consorciadas, constataram maior produtividade de grãos da mamoeira semeada em sucessão, quando as culturas foram cultivadas simultaneamente em relação ao cultivo isolado em SPD. Outro estudo realizado por Silva et al. (2011) mostrou que os consórcios entre aveia preta + ervilhaca + nabo forrageiro e aveia preta + *C. juncea* L. em plantio direto, possibilitaram maior cobertura e permanência da palhada sobre o solo, além de serem capazes de melhorar os atributos físicos do solo ao longo do tempo.

Mesmo apresentando alto potencial e agregando benefícios ao sistema com maior biodiversidade, devido a inexistência de modelos eficientes, é difícil entender os efeitos dos diferentes fatores e suas inter-relações nos microbiomas em sistemas de cultivos multiespécies ou consorciados (MALÉZIEUX et al., 2009).

Na escolha de uma espécie de cultura de cobertura a ser cultivada em um sistema de rotação de culturas, torna-se decisivo conhecer a sua adaptação à região na qual será inserida e sua habilidade em se desenvolver em ambientes pouco favoráveis, uma vez que as culturas de interesse econômico são estabelecidas nas épocas mais propícias (ALVARENGA et al., 2001). Além da observância da característica adaptabilidade, vários outros fatores devem ser levados em consideração, dentre os quais, inclui o manejo integrado de plantas daninhas. Nessa linha, espécies que possuem efeitos alelopáticos têm auxiliado significativamente no controle de espécies infestantes em cultivos subsequentes.

Gazziero et al. (2010), constaram que a cobertura morta proporcionada pela aveia, resultou em plantas de buva com menor altura no momento da dessecação em pré-semeadura da soja, em comparação aos resíduos deixados pelo milho safrinha. Outros benefícios advindos do cultivo de aveia se referem a facilidade para aquisição das

sementes e implantação da cultura, rapidez na formação de cobertura, lenta decomposição e ciclo adequado (SILVA et al., 2006).

Outra espécie que possui destaque como cultura de cobertura de acordo com Heinrichs et al. (2001), é a ervilhaca peluda, devido à sua grande capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, contribuindo assim para a melhoria do balanço desse nutriente no solo. Entretanto, quando cultivada isoladamente, por possuir baixa relação C/N, o resíduo vegetal da ervilhaca tem alta taxa de decomposição, o que torna curta a duração de sua palhada na superfície do solo (DA ROS; AITA, 1996).

Da mesma forma, o nabo forrageiro, espécie pertencente à família das crucíferas, tem sido utilizado na região centro sul do Brasil como cultura de cobertura em sistemas de semeadura direta, pois é uma cultura que apresenta alto potencial de descompactação biológica do solo, devido ao seu sistema radicular pivotante e agressivo, alta produção de biomassa e aporte de matéria orgânica no sistema, relativa tolerância a seca e geada, além de ser facilmente adaptável a solos com problemas de acidez e baixa fertilidade (WILLIAMS; WEIL, 2004; BARROS; JARDINE, 2013).

2.3. Atributos físicos do solo em sistema plantio direto

Diversos estudos têm mostrado que as práticas conservacionistas que norteiam o SPD, têm levado a melhorias significativas na qualidade física do solo (MUNKHOLM et al., 2013; NUNES et al., 2017), proporcionando maior aporte de carbono no sistema, o que melhora sua estrutura, preserva maior quantidade de água no solo, protege-o da desagregação das partículas e dos processos erosivos do solo (OLIVEIRA NETO, 2017).

No entanto, ao mesmo tempo em que o sistema de plantio direto proporciona maior proteção do solo contra processos erosivos, já foi constatado em diversas situações a ocorrência do aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade, principalmente devido ao acúmulo das pressões provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas, causando alterações no arranjo do espaço poroso e conseqüentemente problemas relacionados à compactação do solo (BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

Problemas relacionados a degradação física e compactação do solo em SPD, predominantemente têm ocorrido devido à ausência da prática da rotação de culturas nos sistemas de produção. Extremamente praticada no Brasil, a sucessão de culturas (soja/milho safrinha) tende a provocar degradação física do solo por se tratar de um número reduzido de espécies, desfavorecendo o aporte de carbono orgânico no sistema e inviabilizando a utilização do SPD a longo prazo.

Por outro lado, a prática da rotação de culturas, além de contribuir para a melhoria da estrutura e agregação do solo, traz ao ambiente de produção grande variabilidade de raízes de diferentes espécies, que têm influenciado significativamente no aumento e formação de bioporos, permitindo adequada aeração, ao qual promove maior desenvolvimento radicular das culturas inseridas no sistema (INDORIA et al., 2017; BERTOLLO; LEVIEN, 2019; MTYOUBILLE et al., 2020).

A quantificação da agregação e da estrutura do solo é importante parâmetro indicador para avaliar a qualidade física do mesmo e possui correlação direta e positiva com os níveis da matéria orgânica (KING et al., 2019). Solos com altos teores de matéria orgânica possuem como característica, boa agregação, o que reflete em melhor infiltração de água e reduz problemas com erosões (NUNES et al., 2017). Estudos têm constatado que a rotação de culturas em SPD vem sendo uma importante estratégia no aumento dos níveis da matéria orgânica do solo, impactando em melhorias na sua estrutura pelo aumento da agregação (NUNES et al., 2015; CONYERS et al., 2019).

Tiemann et al. (2015) avaliando o efeito da rotação de culturas em SPD na estabilidade de agregados do solo, observaram que a maior diversidade de espécies vegetais em um manejo de rotação, proporciona maior agregação do solo e melhorias em sua estrutura, e isso tem relação direta com o aumento dos níveis de matéria orgânica em sistemas altamente diversificados. Concomitantemente, Munkholm et al. (2013), observaram efeito positivo da rotação de culturas nos resultados da avaliação visual da estrutura do solo, os autores ainda observaram que os melhores escores visuais da estrutura do solo influenciaram o maior rendimento produtivo das culturas.

Melhorias na qualidade estrutural do solo, criam um ambiente que propicia maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas, maior atividade biológica e fluxo de ar e água, por consequência, há maior eficiência na absorção de nutrientes, podendo significar aumentos consistentes na produtividade das culturas, a exemplo da soja (ORTIZ et al., 2019).

A densidade do solo é outro atributo que pode ser utilizado para a avaliação da sua qualidade física. Sabe-se que durante os primeiros anos após a implantação do SPD, a pressão exercida sobre o solo pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, sobretudo em solos argilosos e com teores excessivos de umidade, ocasionam aumento da densidade do solo (ORTIZ et al., 2019).

A exemplo disso, em diversas situações, principalmente em camadas superficiais e no início da implantação do sistema, os valores de resistência do solo à penetração são

maiores em SPD, quando comparados ao sistema de plantio convencional (ORTIGARA et al., 2014; VALENTE et al., 2019), pois a pressão externa aplicada ao solo provoca um novo acomodamento e disposição das partículas, reduzindo o espaço poroso e resultando em incremento nos valores de resistência do solo à penetração (STRECK et al., 2004).

Entretanto, o constante aporte de palhada ao longo dos anos em sistemas de rotação de culturas contribui gradativamente para o aumento nos níveis de matéria orgânica do solo e os valores de densidade do solo tendem a ser reduzidos (GONZÁLEZ et al., 2016). A diminuição na densidade do solo em SPD foi observada por Haruana e Nkongolo (2015), que inserindo culturas de cobertura como ervilhaca e centeio, observaram diminuições significativas na densidade do solo em relação ao monocultivo de soja e milho. Os autores atribuem a queda dos valores de densidade do solo em tratamentos envolvendo o cultivo de culturas de cobertura devido a maior produção de palhada nesses sistemas, quando a densidade diminuiu à medida em que os resíduos vegetais foram lentamente decompostos pelos microorganismos e a matéria orgânica foi incorporada, principalmente em camadas superficiais do solo.

O aumento da infiltração de água no solo, que está intimamente relacionado a melhoria das condições físicas e a matéria orgânica, também é um benefício da adoção da rotação de culturas em SPD. Prando et al. (2010), estudando a capacidade de infiltração de água no solo com e sem escarificação e rotação de culturas por dois anos, observaram maior taxa de infiltração de água em solo escarificado apenas no primeiro ano após a operação. A partir do segundo ano, os autores concluíram que o sistema radicular das espécies nas parcelas sem escarificação, proporcionou melhor estado de agregação e estrutura ao solo, capaz de aumentar a taxa de infiltração de água, independente da cultura utilizada.

Em outro estudo, Silveira Junior et al. (2012) avaliaram a eficiência da descompactação biológica com o cultivo de nabo forrageiro e mecânica pelo manejo do solo com escarificação em uma área de SPD consolidado num Latossolo de textura argilosa. Os autores não observaram diferenças nos atributos densidade do solo, porosidade, permeabilidade ao ar e continuidade de poros, entre os dois métodos, 18 meses após sua utilização, constatando limitada persistência do efeito da escarificação. Resultados similares foram obtidos por, Nunes et al. (2015), que observaram que efeitos imediatos de redução da densidade do solo, resistência do solo à penetração e aumento da macroporosidade proporcionados pela escarificação, entretanto, um ano e meio após essa intervenção mecânica, tais atributos físicos voltaram às condições originais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento e descrição edafoclimática

O presente estudo foi realizado em um experimento conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados, no município de Dourados – MS, com coordenadas geográficas de 22° 14' S e 54° 59' W e altitude de 455 m (Figura 1).



Figura 1. Imagem aérea do experimento, localizado na fazenda experimental de ciências agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, MS.

O clima predominante no local, segundo a classificação de Köeppen (1948) é do tipo Cwa, com inverno seco. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2018) e sua textura muito argilosa conforme é apresentada na Quadro 1.

Quadro 1. Textura do solo da Área Experimental na FAECA, UFGD, Dourados, MS, 2018.

Camadas	Argila	Silte	Areia
(cm)	-----kg kg ⁻¹ -----		
0-10	0,616	0,215	0,168
10-20	0,650	0,202	0,148
20-30	0,650	0,216	0,134
30-40	0,683	0,194	0,123
40-50	0,683	0,201	0,116

O estudo na área teve início em 2009, após correção e preparo do solo. Desde então, os tratamentos de sucessão de culturas, caracterizado pelo cultivo de soja na primeira safra e milho solteiro ou milho + braquiária na segunda safra (safrinha), foram implantados todos os anos no mesmo local. No caso das parcelas com rotação de culturas, a soja e o milho alternaram-se nas mesmas parcelas ao longo dos anos. Os tratamentos utilizados na segunda safra (outono/inverno) também se revezavam, ou seja, a soja, o milho e as plantas utilizadas na segunda safra só voltavam no mesmo local após dois anos. Em agosto de 2017, a área recebeu uma calagem à lanço, definida a partir da interpretação da análise de solo, com intuito de aumentar os teores de magnésio do solo.

A caracterização química do solo foi realizada em outubro de 2018 na camada de 0-20 cm, conforme Raij e Quaggio (1983), e os resultados se encontram apresentados na Quadro 2.

Quadro 1 - Caracterização química do solo da área experimental amostrado na camada de 0-20 cm em outubro de 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ + Al ³⁺	K ⁺
	CaCl ₂	(cmolc dm ⁻³)				
Pousio	5,25	0,13	6,40	1,66	4,25	0,35
Milho	5,27	0,16	6,57	1,79	4,27	0,36
Milho + braquiaria	5,32	0,15	6,25	1,73	4,12	0,35
Milheto	5,38	0,14	6,92	1,88	4,09	0,39
Milheto+C. <i>ochroleuca</i>	5,14	0,11	6,42	1,60	3,62	0,35
Aveia branca	5,21	0,20	6,24	1,79	4,29	0,41
Ervilhaca	5,19	0,14	6,37	1,67	4,06	0,32
Nabo forrageiro	5,31	0,13	6,14	1,70	3,68	0,40

Tratamentos	SB	CTC	P	V	MO
	(cmolc dm ⁻³)		(mg dm ⁻³)	(%)	(g kg ⁻¹)
Pousio	8,41	12,66	16,65	64,73	25,30
Milho	8,70	12,72	15,72	66,59	27,48
Milho + braquiaria	8,31	12,19	17,31	67,03	28,94
Milheto	9,19	12,89	16,60	68,56	28,59
Milheto+C. <i>ochroleuca</i>	8,37	12,33	13,04	65,65	28,85
Aveia branca	8,44	12,60	18,98	64,17	30,67
Ervilhaca	8,36	12,63	11,89	64,78	31,49
Nabo forrageiro	8,23	11,91	15,29	68,29	31,94

Legenda: SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação de bases. M.O. = matéria orgânica do solo.

Os dados climáticos referentes aos valores médios de precipitação pluviométrica e de temperaturas máxima e mínima foram obtidos na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no município de Dourados, MS, durante os períodos de avaliação do experimento (Figuras 2 e 3).

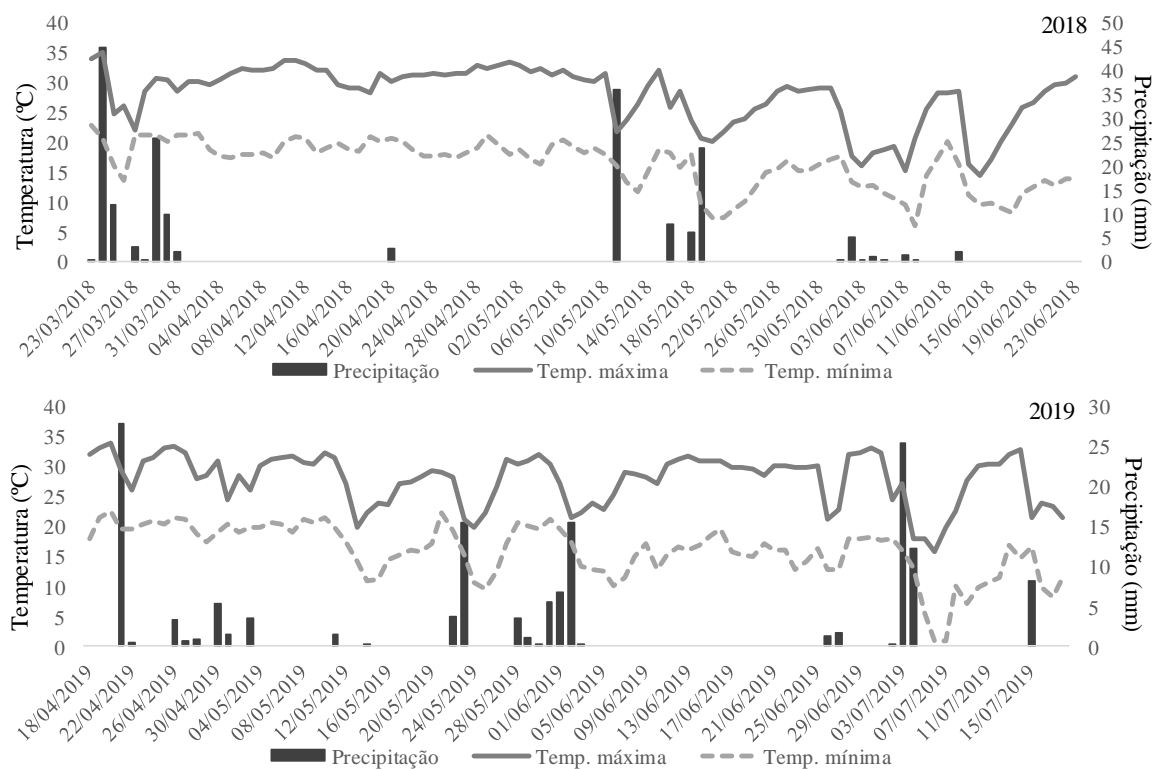


Figura 2. Temperaturas máximas e mínimas (°C) e precipitação no período de 90 dias após a semeadura das plantas de cobertura em 2018 e 2019. Dourados, MS.

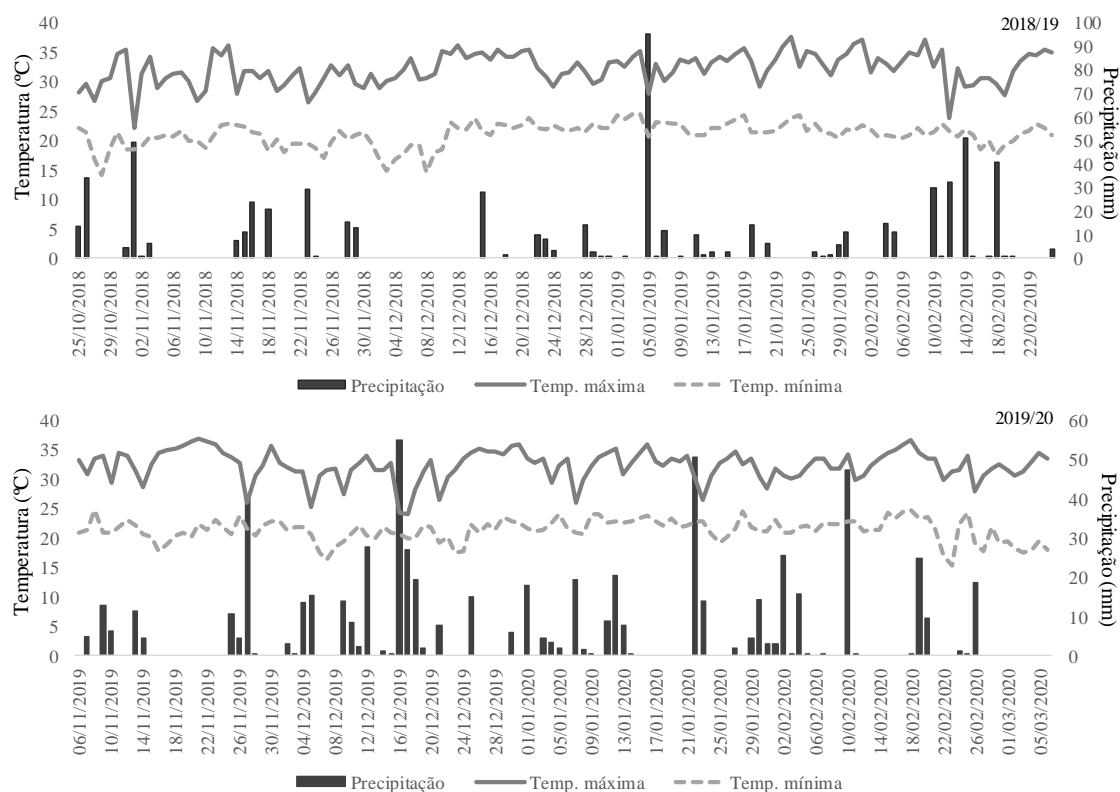


Figura 3. Temperaturas máximas e mínimas (°C) e precipitação no período de 120 dias após a semeadura da soja safra 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.

As informações climáticas referentes aos cultivos da safra outono/inverno de 2018 e 2019, contemplaram 90 dias (Figura 2) e os dados do período do cultivo da soja safra 2018/19 e 2019/20 tiveram informações referentes a 120 dias (Figura 3), a partir da data de semeadura das culturas em cada período.

3.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado no experimento é o de blocos casualizados, no qual foram selecionados oito tratamentos com quatro repetições, que consistiram de três sistemas de sucessão de culturas:

- (1) soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na primeira safra e pousio no outono/inverno (segunda),
- (2) soja na primeira safra e milho (*Zea mays* L.) na segunda,
- (3) soja na primeira e milho + braquiária (*Urochloa ruziziensis*) na segunda; e cinco rotações de culturas antecedendo a soja:
- (4) milheto (*Pennisetum glaucum* L.),
- (5) milheto + *Crotalaria ochroleuca*,
- (6) aveia branca (*Avena sativa*),
- (7) ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth),
- (8) nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.).

Os tratamentos de sucessão 1, 2 e 3 foram sempre cultivados com as sucessões acima descritas, já os tratamentos 4 a 8 foram cultivados sempre na segunda safra em um sistema de rotação no qual as parcelas são duplicadas, do modo que, elas possam alternar com outras espécies de cobertura de solo e a soja e o milho possam se alternar na primeira safra, desta forma, tanto a soja, quanto as culturas de cobertura retornam na mesma área após 2 anos. Milheto alternou com canola nas safras de inverno 2016 e 2017 e com trigo mourisco em 2018 e 2019. Milheto + *C. ochroleuca* alternou com cártamo e aveia branca com níger nas últimas quatro safras. Já o nabo forrageiro alternou com milheto nas safras 2016 e 2017 e com nabo + aveia branca + ervilhaca em 2018 e 2019 (Quadro 3).

Quadro 3. Sequência de tratamentos no experimento de sucessão e rotação de culturas, entre os anos de 2016 a 2020. Tratamentos 1 e 2 são sucessões, tratamentos 3,4,5 e 6 são rotações em parcelas duplicadas, no qual foram avaliadas as parcelas destacadas em negrito.

Amostragem para atributos físicos do solo

Trat.	Inverno 2016	Verão 2016/17	Inverno 2017	Verão 2017/18	Inverno 2018	Verão 2018/19	Inverno 2019	Verão 2019/20
1	Pousio	Soja	Pousio	Soja	Pousio	Soja	Pousio	Soja
2	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho	Soja
3	Milho + braquiária	Soja	Milho + braquiária	Soja	Milho + braquiária	Soja	Milho + braquiária	Soja
4a	Milheto	Soja	Canola	Milho	Milheto	Soja	Trigo Mourisco	Milho
4b	Trigo Mourisco	Milho	Milheto	Soja	Trigo Mourisco	Milho	Milheto	Soja
5a	Milheto+C. <i>ochroleuca</i>	Soja	Cártamo	Milho	Milheto+C. ochroleuca	Soja	Aveia preta+ Milheto+ TM+ ervilhaca	Milho
5b	Cártamo	Milho	Milheto+C. <i>ochroleuca</i>	Soja	Cártamo	Milho	Milheto + C. ochroleuca	Soja
6a	Aveia branca	Soja	Níger	Milho	Aveia branca	Soja	Níger	Milho
6b	Níger	Milho	Aveia branca	Soja	Níger	Milho	Aveia branca	Soja
7a	Ervilhaca	Soja	<i>Crotalaria juncea</i>	Milho	Ervilhaca	Soja	<i>Crotalaria spectabilis</i>	Milho
7b	<i>Crotalaria juncea</i>	Milho	Ervilhaca	Soja	<i>C. spectabilis</i>	Milho	Ervilhaca	Soja
8a	Nabo forrageiro	Soja	Milheto	Milho	Nabo forrageiro	Soja	Nabo+ Aveia branca+ Ervilhaca	Milho
8b	Milheto	Milho	Nabo forrageiro	Soja	Nabo+ Aveia branca+ Ervilhaca	Milho	Nabo forrageiro	Soja

Legenda: Trat: Tratamento; TM: Trigo Mourisco.

3.3. Instalação e condução

3.3.1. Culturas de cobertura e sucessão

As unidades experimentais contêm 15 m de largura por 35 m de comprimento, totalizando 525 m². A semeadura das culturas de cobertura nos tratamentos de rotação ocorreu nos dias 20/03/2018 e 18/04/2019, utilizando uma semeadora semeio de oito linhas distanciadas entre si de 0,4 m, modelo TD, para sementes miúdas com sistema de rotor. A quantidade média de sementes utilizada foi de 10 kg ha⁻¹ para milho, 7 kg de cada espécie para milho + *C. ochroleuca*, 40 kg ha⁻¹ para aveia branca, 5 kg ha⁻¹ para ervilhaca e 15 kg ha⁻¹ para nabo forrageiro.

O milho (híbrido simples DKB 177 VT PRO) foi semeado nos dias 15 e 18 de março nos anos de 2018 e 2019 respectivamente, no espaçamento de 0,9 m, com 60.000 sementes ha⁻¹, buscando estabelecer cerca de 5,4 plantas m⁻¹, totalizando e uma população de plantas final próxima a 57.000 plantas ha⁻¹.

No tratamento milho + braquiária semeou-se o mesmo híbrido de milho utilizado no cultivo solteiro, juntamente com *U. ruziziensis*. Primeiro foi semeada a forrageira em um espaçamento de 0,4 m, e logo em seguida o milho em um espaçamento de 0,90 m, ou seja, em cada entrelinha da cultura do milho houve duas linhas de *U. ruziziensis*. Para o estabelecimento de 15 plantas m² de *U. ruziziensis* utilizou-se aproximadamente 4 kg ha⁻¹ de sementes.

O milho safrinha e o milho + braquiária receberam adubação de manutenção, com base na exportação dos grãos (250 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 08-20-20 + 0,15% B + 0,50% Zn na base), enquanto as plantas utilizadas apenas para a cobertura do solo e rotação não receberam adubação.

3.3.2. Cultura da soja

A soja (cultivar Monsoy 6410 IPRO) foi semeada nos dias 25 de outubro de 2018 e 05 de novembro de 2019 em cada safra com densidade média de 10 e 12 sementes m⁻¹ para as safras 2018/19 e 2019/20 respectivamente, e um espaçamento de 0,45 m entre linhas.

A adubação de semeadura foi de 400 kg ha⁻¹ do formulado 05-25-06 + 0,15% de B + 0,5% de Zn + 9% de S-elementar + 140 kg por hectare de cloreto de potássio (60% K₂O) em cobertura.

As sementes de soja foram co-inoculadas com 150 ml de inoculante contendo *Bradyrhizobium* e 100 ml contendo *Azospirillum brasiliense*, além de 250 ml de regulador de crescimento a base de cinetina, ácido giberélico e ácido indol-butírico para cada 50 kg de sementes.

O controle de plantas daninhas aconteceu cerca de 30 dias antes da semeadura da soja com a aplicação de glifosato, na dose de 3 L ha⁻¹. Na semana que antecedeu a semeadura da soja aplicou-se 2 L ha⁻¹ de paraquat, associado a 2 L ha⁻¹ de Dual Gold® e 200 ml ha⁻¹ de espalhante adesivo. Em pós-emergência foram realizadas duas aplicações de glifosato aos 15 e 35 dias após a emergência.

O controle de doenças (ferrugem asiática da soja e doenças de final de ciclo) foi realizado quimicamente, com 3 aplicações de fungicidas. Na primeira, aos 40 dias após a emergência foi aplicado um produto a base de azoxistrobina + benzovindiflupir, associado a outro fungicida a base de ciproconazol + difenoconazol. Na segunda aplicação utilizou-se dois fungicidas, sendo um a base de azoxistrobina + benzovindiflupir associado a outro a base de clorotalonil. Na terceira associou-se um fungicida a base de clorotalonil a outro contendo ciproconazol + difenoconazol.

O controle de pragas foi necessário para percevejo marrom (*Euschistus heros*), com duas aplicações, sendo, uma a base de tiametoxam + lambda-cialotrina e outra à base de imidacloprido + bifentrina.

3.4. Amostragens e avaliações

3.4.1. Culturas de cobertura, sucessão e palhada em pré-semeadura da soja

A avaliação da biomassa seca das culturas de cobertura foi realizada com o corte das plantas no estágio de florescimento pleno, com três repetições de 1,0 m² em cada parcela cortando as plantas rente ao solo. No caso dos tratamentos de sucessão contendo milho, as espigas foram desprezadas para tal análise. Foram definidas amostras de 100 gramas para secagem em estufa e determinação da massa seca.

A palhada sobre o solo em pré-semeadura da soja foi mensurada na semana que antecedeu a semeadura da cultura, utilizando-se armação de metal de 1,0 m² em três pontos por parcela. Para as avaliações de biomassa seca das culturas e palhada sobre o

solo em pré-semeadura da soja foram amostrados 100 gramas da massa úmida coletada, levando-as a estufa de circulação forçada de ar, a uma temperatura de 65°C até atingir massa constante, para corrigir o peso inicial das amostras e o resultado foi expresso em Mg kg^{-1} de massa seca por hectare.

3.4.2. Atributos físicos e matéria orgânica do solo

Em setembro de 2018, antes da semeadura da soja, amostras de solo foram coletadas com estrutura preservada, em cilindros metálicos de 98 cm^{-3} , raio de 2,5 cm e 5,0 cm de altura, nas entrelinhas das culturas de cobertura já manejadas, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm, ou seja, centralizados nas profundidades de 5, 15, 25, 35, 45 cm respectivamente, sendo coletadas 4 amostras em cada tratamento. As amostras foram envolvidas em papel filme e armazenadas a 4° C. Determinou-se a densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, pela saturação dos anéis em recipiente que continha água, durante período necessário até que o solo estivesse totalmente saturado, levados à mesa de tensão de 6 kPa, até que fosse cessado o gotejamento e posteriormente secos em estufa a 105 °C por 24 horas, de acordo com Almeida et al. (2017).

Para a determinação da resistência do solo à penetração, utilizou-se o penetrômetro eletrônico digital (PenetroLOG) da marca Falker. Os dados de resistência do solo à penetração foram classificados (a cada 10 cm) até 50 cm de profundidade e apresentados em Megapascal (MPa). Fizeram-se, aleatoriamente, cinco amostragens em cada parcela experimental.

As análises de estabilidade de agregados foram determinadas conforme metodologia descrita por Yoder (1936), as coletas de amostras de solo, por meio de blocos de solo com estrutura preservadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm, sendo coletada uma amostra por camada/parcela, a seguir, foram secas ao ar e passadas por peneiras de 8,00 e 4,00 mm, sendo empregados nas análises aqueles agregados retidos na peneira de 4,00 mm. Assim, a análise de estabilidade de agregados pelo peneiramento úmido, foi realizada mediante o peneiramento durante 10 minutos, em jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,250 e 0,125 mm, dentro de recipiente que continha água. O índice de estabilidade avaliado foi o diâmetro médio geométrico (DMG), conforme Kemper e Rosenau (1986).

Foram coletadas amostras de solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade em quatro pontos por parcela para a formação de uma amostra composta para a determinação dos teores de matéria orgânica do solo (FONTANA; CAMPOS, 2017).

3.4.3. Componentes de produção da soja

A colheita da soja foi realizada nos dias 24 de fevereiro de 2019 e 04 de março de 2020. As mensurações a campo e a colheita da soja para determinar os componentes de produção ocorreu após a maturação fisiológica coletando duas linhas de cinco metros, em três pontos na parcela, perfazendo um total de 30 m de área útil.

Para componentes de produção avaliou-se 10 plantas, exceto produtividade, no qual utilizou-se todas as plantas da área útil supracitada. As variáveis avaliadas foram:

- **Altura de planta:** Foi determinada com auxílio de uma trena adaptada, medindo-se a distância entre o nível do solo até o ápice da planta, em dez plantas ao acaso dentro de cada parcela próximo ao momento da colheita.
- **Altura de inserção da primeira vagem:** Determinou-se também por meio de uma trena adaptada, graduada em centímetros, tomando-se a distância entre o nível do solo e o ponto de inserção da primeira vagem.
- **Número de vagens por planta:** Foram contabilizadas as vagens das 10 plantas, com os valores representando a média de vagens por planta.
- **Massa de mil grãos:** Após determinada a produtividade foi efetuada a contagem de oito subamostras de 100 grãos por repetição de cada tratamento. As amostras foram pesadas em balança de precisão e corrigidas para umidade de 13%, conforme as Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 2009).
- **Produtividade:** Foi determinada por meio da trilha das plantas contidas na área útil já citada, dentro de cada parcela e repetição. Após os grãos limpos, os mesmos tiveram suas massas aferidas em balança digital, corrigindo-se o grau de umidade para 13%, com os valores expressos em kg ha^{-1} .

3.5. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias das variáveis foram comparados pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2011). As variáveis biomassa seca das

culturas de outono/inverno, palhada oriunda dos sistemas de sucessão/rotação de culturas e características agronômicas da soja foram avaliadas na safra 2018/19 e 2019/20. A macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo e resistência do solo a penetração as avaliações foram realizadas próximo a semeadura da soja safra 2018/19 nas profundidades 0-10, 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm. As variáveis DMG e matéria orgânica do solo foram avaliadas na mesma época que os demais atributos físicos do solo, porém, somente nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Biomassa seca da parte aérea de plantas de cobertura

Os resultados de biomassa seca das culturas de cobertura em cada ano de cultivo são apresentados no Quadro 4. Na safra inverno de 2018 o tratamento consórcio milho + braquiária, apresentou a maior quantidade de biomassa seca da parte aérea com 7,28 Mg ha⁻¹, como também na safra de inverno de 2019 com a produção de 6,28 Mg ha⁻¹, seguido das rotações envolvendo ervilhaca (6,43 Mg ha⁻¹), nabo forrageiro (6,34 Mg ha⁻¹) e da sucessão soja/milho (6,31 Mg ha⁻¹).

Quadro 4. Valores médios da biomassa seca da parte aérea do milho e das culturas de cobertura. Dourados, MS, safra inverno 2018 e 2019.

Tratamentos	Biomassa seca (Mg ha ⁻¹)	
	2018	2019
Pousio	0,00 E	0,00 D
Milho	6,31 B	5,86 A
Milho + braquiaria	7,28 A	6,82 A
Milheto	5,50 C	4,52 B
Milheto + <i>C. Ochroleuca</i>	5,70 C	5,16 B
Aveia branca	3,41 D	3,07 C
Ervilhaca	6,43 B	6,12 A
Nabo forrageiro	6,34 B	5,53 B
CV (%)	9,63	14,17
Média	5,12	4,63

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; *C. Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

A maior produção de fitomassa resultante do consórcio entre milho e braquiária na safra inverno de 2018, evidencia a alta capacidade das espécies de metabolismo C4 na produção de matéria seca, e o melhor aproveitamento da mesma área obtido por esse sistema de manejo. Nesse consórcio, a planta de milho tem grande capacidade de produção de massa seca, devido a seu alto porte e a braquiária se desenvolve nas entre linhas otimizando os recursos disponíveis no solo.

Ainda na safra inverno de 2018, o consórcio entre as culturas milheto + *C. ochroleuca*, e o milheto cultivado em solteiro resultaram em produção de fitomassa seca da parte aérea de 5,70 e 5,50 Mg ha⁻¹ respectivamente, significativamente maior do que o cultivo da aveia branca com 3,41 Mg ha⁻¹ (Quadro 4).

Mesmo não tendo diferença significativa na produção de biomassa seca da parte aérea do cultivo do milheto em relação ao cultivo do milheto consorciado com *C.*

ochroleuca, são evidentes os benefícios obtidos com o cultivo simultâneo de espécies na mesma área. A inserção de uma leguminosa como a *C. ochroleuca* pode proporcionar aumento da disponibilidade de nitrogênio devido a sua fixação biológica atmosférica (SILVA et al., 2010), por outro lado, o milho se destaca pela alta capacidade de ciclagem de K e Mg (MARCELO et al., 2012). Isso mostra a importância da adoção de espécies de diferentes famílias em um programa de rotação de culturas. Silva et al. (2006), relatam a importância do cultivo de espécies com alta capacidade de produção de massa seca e ciclagem de nutrientes em SPD, pois as mesmas influenciam no aporte de matéria orgânica no sistema e na disponibilidade e teor nutricional das culturas subsequentes.

A safra inverno de 2019 foi marcada pela menor produção de biomassa das culturas devido a maior ocorrência de intempéries climáticas, como a geada no início de julho do referido ano que afetou significativamente o desenvolvimento vegetativo do milho, braquiária, milho e *C. ochroleuca*.

Outro fator que prejudicou a produção de biomassa das culturas na safra inverno 2019 foi a menor incidência de chuvas neste período, devido a semeadura mais tardia das culturas em relação à safra inverno de 2018. Aos 30 dias após a semeadura (DAS) das culturas na safra inverno de 2018, houveram precipitações pluviométricas acumuladas de 100 mm, sendo que neste mesmo período em 2019 o acumulado foi de 45 mm. Ao comparar a incidência de chuvas aos 60 DAS em 2018 o acumulado foi de 174 mm enquanto que para a safra de 2019 foi de apenas 97 mm. Tais fatores afetaram o crescimento das culturas de coberturas em 2019 que apresentaram redução média de 490 kg ha⁻¹ de biomassa seca da parte aérea em relação à safra inverno de 2018 (Quadro 5).

Vale ressaltar que nos primeiros 49 dias após a semeadura na safra de inverno de 2018, 97% do volume pluviométrico de 100 mm se concentrou nos 9 dias iniciais, restando para os posteriores 40 dias apenas 2,8 mm. Isso também afetou a produção de biomassa seca das culturas de inverno desta safra, porém, com intensidade menor devido a boa capacidade de retenção de água no solo da área experimental, características de um solo com consideráveis teores de matéria orgânica (Quadro 2) e de textura predominante argilosa (Quadro 1).

Franchini (2014), em um estudo sobre os efeitos de sucessões e rotações de culturas no desempenho agrônomico e produtivo de soja no município de Ponta Porã (MS), observou que a data de semeadura também influenciou significativamente nos resultados de biomassa seca das culturas de inverno utilizadas em sucessão e rotação. Em seu trabalho, o autor semeou a cultura do milho em solteiro e consorciada com braquiária

no início de março e as culturas de cobertura no início de abril e constatou melhores condições climáticas para o cultivo mais antecipado das culturas no período de entre safra.

Assim como na safra inverno de 2018, na safra inverno 2019 o consórcio de milho com braquiária apresentou significativamente a maior produção de biomassa seca da parte aérea com $6,82 \text{ Mg ha}^{-1}$, e no referido ano, estatisticamente igual a biomassa da ervilhaca ($6,12 \text{ Mg ha}^{-1}$) e milho solteiro ($5,86 \text{ Mg ha}^{-1}$). Menores valores em produção de biomassa seca que os tratamentos citados, as rotações com nabo forrageiro ($5,53 \text{ Mg ha}^{-1}$), milheto + *C. Ochroleuca* ($5,16 \text{ Mg ha}^{-1}$) e milheto ($4,52 \text{ Mg ha}^{-1}$), obtiveram resultado intermediário nesta variável. Já a aveia branca apresentou resultado significativamente superior apenas em relação ao tratamento com pousio com $3,07 \text{ Mg ha}^{-1}$ de produção de biomassa seca da parte aérea na safra inverno de 2019 (Quadro 4).

A fim de propiciar cobertura homogênea, melhorar as características do solo e para a manutenção do sistema de plantio direto, Alvarenga et al. (2006), afirmam que devem-se priorizar a utilização de espécies que produzam acima de 6 Mg ha^{-1} de palhada no sistema. No referido trabalho, apenas os cultivos de milho + braquiária, ervilhaca, milho solteiro e nabo forrageiro produziram acima de 6 Mg ha^{-1} de biomassa seca, as quais seriam as quantidades mínimas suficientes para a qualidade do sistema de plantio direto. Entretanto, além da quantidade de palhada, nesse sistema também é importante levar em consideração a qualidade dos resíduos produzidos pelas espécies rotacionadas com diferentes relações C/N, sistemas radiculares e capacidades de ciclar nutrientes que trazem em melhorias aos agroecossistemas (BALOTA, 2017).

4.2 Palhada em pré semeadura da soja

Diferente do resultado médio das duas safras na produção de biomassa seca (Quadro 4), na safra 2018/19, o tratamento envolvendo milho + braquiária não esteve entre os que deixaram maior quantidade de palhada sobre o solo. Isso ocorreu por se tratar de um sistema de cultivos sucessivos, o qual no verão há somente o cultivo da soja, que por sua vez, deixa pouca quantidade de palhada, e a mesma possui baixa relação C/N, sendo torna mais rápida sua decomposição.

Entretanto, nos tratamentos envolvendo rotações de culturas, o cultivo do milho alternado com a soja nas safras de verão, favoreceu o maior aporte de palhada do milho verão, que além de possuir característica de alta relação C/N, segundo Canalli et al. (2019), fornece quantidades de biomassa seca superiores a 10 Mg ha^{-1} .

Quadro 5. Palhada sobre o solo coletada em pré-semeadura da soja nos sistemas de sucessão e rotação de culturas nas safras 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.

Tratamentos	Palhada em pré-semeadura (Mg ha ⁻¹)	
	2018/19	2019/20
Pousio	1,53 F	1,44 D
Milho	5,17 D	4,79 B
Milho + braquiaria	6,49 C	5,45 A
Milheto	7,26 B	4,10 C
Milheto + <i>C. Ochroleuca</i>	7,80 A	4,95 B
Aveia branca	4,15 E	4,15 C
Ervilhaca	5,58 D	5,38 A
Nabo forrageiro	6,66 C	5,27 A
CV (%)	6,03	7,30
Média	5,58	4,44

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; *C. Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

O tratamento que aportou maior quantidade de palhada sobre o solo em pré-semeadura da soja safra 2018/19, foi o consórcio milheto + *C. ochroleuca* (7,80 Mg ha⁻¹), seguido do cultivo do milheto solteiro (7,26 Mg ha⁻¹) e posteriormente do nabo forrageiro e milho + braquiária com 6,66 e 6,49 Mg ha⁻¹ respectivamente (Quadro 7).

Pacheco et al. (2011) em um estudo avaliando a massa seca e ciclagem de nutrientes de diferentes plantas de cobertura, constataram que os tratamentos com a maior cobertura do solo, e maior quantidade de palhada produzida, foram aqueles que apresentaram o maior acúmulo e ciclagem de nutrientes no sistema de produção. Isso infere a importância da atenção a escolha de plantas de cobertura que propiciem alta produção de biomassa com aporte de grande quantidade de resíduos em SPD.

A maior capacidade de manutenção da palhada em cultivos consorciados, também foi observada por Silva et al. (2011), que constaram maior cobertura e permanência da palhada sobre o solo nos consórcios aveia preta + ervilhaca peluda + nabo forrageiro e aveia preta + crotalária, comparado ao cultivo isolado de girassol, crotalária e ervilhaca.

O cultivo simultâneo de milheto e crotalária no presente estudo se mostra promissor para o sistema de semeadura direta, uma vez que o maior aporte de resíduos da cultura do milheto que possui relação C/N mais alta, preserva a palhada sobre o solo por períodos maiores, com uma leguminosa como a *C. ochroleuca*, capaz de fixar grandes quantidades de nitrogênio atmosférico no solo e disponibilizá-lo a culturas subsequentes.

Com resultado significativo, o cultivo do milho solteiro reduziu em 1,32 Mg ha⁻¹ a quantidade de palhada deixada no sistema em relação ao consórcio milho + braquiária em 2018. Dentre os benefícios obtidos da adoção do consórcio milho + braquiária na safra

de inverno em relação ao cultivo do milho solteiro, destaca-se o maior aporte de palhada no sistema, pois a braquiária permanece em desenvolvimento após a colheita do milho, fornecendo uma boa cobertura do solo para o cultivo da soja no verão, além de trazer melhorias para as propriedades do solo, aporte de matéria orgânica e promover a ciclagem de nutrientes (ALVES et al., 2013; CECCON et al., 2013).

Para rotação envolvendo a cultura da ervilhaca a quantidade de palhada produzida na safra de 2018 foi de 5,58 Mg ha⁻¹, valor estatisticamente igual ao do milho, e dentre todas as espécies cultivadas, a que deixou a menor massa de resíduos sob o solo foi a aveia branca (4,15 Mg ha⁻¹) com valor significativamente maior somente que o tratamento pousio (1,53 Mg ha⁻¹), o qual foi mensurado os resíduos oriundos da soja safra 2017/18 (Quadro 5).

Na safra de 2019, os sistemas envolvendo milho + braquiária, ervilhaca e nabo forrageiro foram os que deixaram maior quantidade de palhada no sistema, com 5,45, 5,38 e 5,27 Mg ha⁻¹ respectivamente (Quadro 5), dessas, com exceção do milho e da braquiária, as espécies ervilhaca e nabo forrageiro, possuem característica de tolerância a geada e baixas temperaturas, que concomitantemente ocorreram no referido período.

Próximo a 5 Mg ha⁻¹ de palhada, o consórcio milheto + *C. ochroleuca* também obteve resultado expressivo em 2019, não se diferindo estatisticamente da sucessão soja/milho (4,79 Mg ha⁻¹). Os sistemas de rotação que resultaram na menor quantidade de palhada em pré-semeadura da soja safra 2019/20, foram os cultivados com aveia branca e milheto com respectivamente 4,15 e 4,10 Mg ha⁻¹, superiores apenas que o pousio com 1,44 Mg ha⁻¹ (Quadro 5).

4.3. Atributos físicos do solo

Conforme é apresentado no Quadro 6, na camada de 0 a 10 cm de profundidade os maiores valores em macroporosidade do solo foram obtidos nos tratamentos nabo forrageiro (0,123 m³ m⁻³), milho + braquiária (0,115 m³ m⁻³) e milheto + *C. ochroleuca* (0,108 m³ m⁻³), e com valores significativamente menores nesta variável, estão o milheto (0,102 m³ m⁻³), ervilhaca (0,096 m³ m⁻³), aveia branca (0,094 m³ m⁻³), milho solteiro (0,085 m³ m⁻³) e pousio (0,084 m³ m⁻³).

Quadro 6. Macroporosidade do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
	-----cm-----				
Pousio	0,084 B	0,073 C	0,070 B	0,074 B	0,068 B
Milho	0,085 B	0,077 C	0,076 B	0,070 B	0,070 B
Milho + braquiaria	0,115 A	0,085 B	0,082 B	0,074 B	0,076 B
Milheto	0,102 B	0,085 B	0,092 A	0,095 A	0,099 A
Milheto+ <i>C. Ochroleuca</i>	0,108 A	0,096 A	0,095 A	0,092 A	0,095 A
Aveia branca	0,094 B	0,082 B	0,082 B	0,084 A	0,083 B
Ervilhaca	0,096 B	0,097 A	0,084 B	0,085 A	0,089 A
Nabo forrageiro	0,123 A	0,088 A	0,078 B	0,086 A	0,075 B
CV (%)	11,02	6,56	9,06	10,57	17,81
Média	0,101	0,085	0,082	0,082	0,082

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; *C. Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

Maiores valores em macroporosidade do solo até 10 cm de profundidade na rotação envolvendo a cultura do nabo forrageiro pode ser associada a característica do sistema radicular pivotante agressivo dessa crucífera, capaz de gerar bioporos que podem favorecer o desenvolvimento das raízes de culturas subsequentes, a exemplo disso, Williams e Weil (2004), observaram desenvolvimento radicular da cultura da soja em bioporos deixados por raízes de nabo forrageiro e canola.

Andrade et al. (2009) estudando o efeito de diversas culturas de cobertura na qualidade física do solo, observaram que, na camada de 0-10 cm de profundidade dentre as culturas que proporcionaram os maiores valores em macroporosidade do solo está a braquiária, tanto cultivada em solteiro como consorciada com a cultura do milho.

A inserção de forrageiras nos sistemas de produção torna-se interessante, pois o sistema radicular das braquiárias é altamente eficiente na promoção da estruturação do solo por meio da formação de agregados estáveis, macroporos e canais que propiciam um ambiente favorável para o desenvolvimento radicular de culturas subsequentes (SALTON; TOMAZI, 2014).

Mesmo não estando entre os maiores níveis de macroporosidade dentre os sistemas de rotação na profundidade de 0 a 10 cm, na camada posterior (10 a 20 cm) o tratamento envolvendo ervilhaca foi o que apresentou a maior quantidade de macroporos no solo ($0,097 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), valores esses estatisticamente iguais a do milheto + *C. ochroleuca* ($0,096 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e do nabo forrageiro ($0,088 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), seguido dos tratamentos milho +

braquiária e milho com $0,0085 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e aveia branca com $0,082 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os menores valores em macroporosidade do solo foram encontrados nos cultivos sucessivos de soja/milho e soja/pousio com $0,077$ e $0,073 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente (Quadro 6).

O aumento na macroporosidade da camada de 10-20 cm dos sistemas de rotação de culturas pode ter ocorrido devido aos benefícios do cultivo intercalado, ao longo do tempo, de espécies de diferentes famílias (gramíneas e leguminosas) que possuem diferentes estruturas radiculares. As espécies da família das Poaceae, possuem como característica, um sistema radicular fasciculado e a macroporosidade está ligada a melhor agregação do solo (KONDO et al., 2012), por outro lado, Fidalski e Tormena (2007), observaram maior macroporosidade das espécies pertencentes a família das Fabaceae, devido a decomposição mais acelerada de suas raízes e a formação de bioporos no solo.

Nas profundidades de 20-30 cm no solo, as rotações envolvendo milho e milho + *C. ochroleuca*, apresentaram os maiores valores de macroporsidade do solo. Já na camada de 30-40 cm, todos os tratamentos envolvendo rotação de culturas apresentaram valores de macroporosidade significativamente maiores que os sistemas de cultivo sucessivo. Na última camada de profundidade avaliada (40-50 cm) os maiores níveis de macroporosidade se mantiveram nas rotações envolvendo milho, milho + *C. ochroleuca* e ervilhaca (Quadro 6).

Para a camada superficial estudada (0-10 cm), nota-se que os valores de macroporosidade estão próximos do limite apontado por Spera et al. (2009) para solos de textura argilosa de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para um satisfatório desenvolvimento das plantas. Entretanto, abaixo dessa camada, os cultivos sucessivos de soja / pousio e soja / milho, tendem a ter diminuições gradativas da macroporosidade, fato que também foi observado para a sucessão soja / milho + braquiária com valores críticos principalmente nas camadas de 30-40 e 40-50 cm de profundidade (Quadro 6).

Mesmo com o limite crítico pré-estabelecidos na literatura para macroporosidade de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para solos argilosos (SPERA et al., 2009), torna-se necessária a pesquisa em diferentes condições, como espécie vegetal de interesse econômico utilizada, atividade biológica do solo e a interação do regime de umidade nas respostas das plantas (ANDRADE; STONE, 2009). Devido a isso, no presente estudo, as avaliações dos sistemas de produção não se restringiram somente aos atributos físicos do solo, mas também a resposta da cultura da soja inserida em cada tratamento.

Estudos constatam que a textura do solo possui grande influência na porosidade, a exemplo disso, solos de textura argilosa tendem a possuir menores valores em

macroporosidade, devido ao encaixe natural das partículas de argila, pela quebra dos macroporos em poros menores, por consequência o aumento em sua microporosidade (REICHERT et al., 2009; GOMES et al., 2019).

Também vale ressaltar que devido ao revolvimento mínimo do solo e acúmulo das pressões provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas ao longo do tempo, em áreas de plantio direto, geralmente são observados menores valores de macroporosidade do solo (REICHERT et al., 2009; BERTOLLO; LEVIEN, 2019), fato confirmado pelo trabalho de Tormena et al. (2002), que constataram que os níveis de produtividade das culturas podem não serem afetados pela menor macroporosidade em sistemas que utilizam culturas de cobertura, devido a maior continuidade dos poros produzidos pelas raízes de diferentes espécies em rotação e pelo incremento nos teores de matéria orgânica em sistemas de plantio direto.

Dentre os tratamentos, não houve variações significativas na microporosidade (Quadro 7). Bonini et al. (2015) relatam que o atributo microporosidade do solo é pouco influenciado pela ação antrópica, estando mais relacionada com a textura do solo, que é uma característica intrínseca do mesmo. Numericamente a sucessão soja / pousio foi a que apresentou os menores valores em microporosidade com $0,399 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Quadro 7), porém, ainda assim dentro dos valores considerados adequados por Azevedo e Dalmolin (2006), que preconizaram níveis de microporosidade acima de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Quadro 7. Microporosidade do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
	-----cm-----				
Pousio	0,384 A	0,385 A	0,388 A	0,409 A	0,429 A
Milho	0,417 A	0,389 A	0,404 A	0,415 A	0,444 A
Milho + braquiaria	0,412 A	0,407 A	0,416 A	0,432 A	0,443 A
Milheto	0,407 A	0,422 A	0,401 A	0,402 A	0,405 A
Milheto+ <i>C. Ochroleuca</i>	0,390 A	0,424 A	0,415 A	0,427 A	0,422 A
Aveia branca	0,421 A	0,413 A	0,421 A	0,416 A	0,409 A
Ervilhaca	0,420 A	0,408 A	0,408 A	0,429 A	0,400 A
Nabo forrageiro	0,397 A	0,402 A	0,423 A	0,412 A	0,429 A
CV (%)	5,40	4,24	6,56	6,02	6,74
Média	0,406	0,406	0,409	0,418	0,423

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; *C. Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

Entretanto, para a porosidade total, que consiste na soma do macro e microporosidade do solo, para a camada de 0-10 cm do solo, observa-se decréscimo nos valores desta variável na sucessão soja / pousio ($0,468 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), e de 10-20 cm de profundidade do solo, além do tratamento envolvendo pousio ($0,458 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), foram encontrados valor significativamente menor em porosidade total do solo também na sucessão soja / milho safrinha ($0,466 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para as demais profundidades avaliadas não foram encontradas diferenças significativas em porosidade total do solo entre os tratamentos avaliados (Quadro 8).

Quadro 8. Porosidade Total do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	Porosidade Total do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
	-----cm-----				
Pousio	0,468 B	0,458 B	0,458 A	0,483 A	0,497 A
Milho	0,502 A	0,466 B	0,480 A	0,485 A	0,514 A
Milho + braquiaria	0,527 A	0,492 A	0,498 A	0,505 A	0,519 A
Milheto	0,508 A	0,506 A	0,493 A	0,497 A	0,503 A
Milheto+C. <i>Ochroleuca</i>	0,498 A	0,519 A	0,510 A	0,519 A	0,517 A
Aveia branca	0,514 A	0,495 A	0,503 A	0,500 A	0,492 A
Ervilhaca	0,516 A	0,505 A	0,491 A	0,513 A	0,489 A
Nabo forrageiro	0,520 A	0,490 A	0,501 A	0,497 A	0,504 A
CV (%)	4,13	3,77	5,33	5,35	6,28
Média	0,507	0,491	0,492	0,500	0,504

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; C. *Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

O limite inferior para a porosidade total ideal para os solos agrícolas de acordo com Azevedo e Dalmolin (2006), deve ser de $0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, todavia a partir do momento em que a vegetação nativa é retirada e o solo sofre a ação antrópica, objetivando-se a produção de grãos, fibras, entre outros, há alterações em seus atributos, portanto em cada tipo de solo existem variabilidades quanto sua capacidade de suporte, tornando variáveis as características consideradas ideias para cada ambiente (BORGES et al., 2016).

A rotação de cultura em sistemas de plantio direto, propicia um ambiente ao qual ao longo do tempo, o sistema radicular das diferentes espécies cultivadas, ocasionam aumento da quantidade de poros biológicos, que auxiliam o desenvolvimento radicular de algumas culturas até mesmo em camadas mais compactadas, isso torna a prática da

rotação de culturas fundamental para a sustentabilidade do sistema de plantio direto (ANDRADE et al., 2009).

Para a densidade do solo, níveis mais altos foram observados nos tratamentos de sucessão soja/pousio e soja/milho safrinha em todas as profundidades avaliadas, com exceção a camada superficial (0-10 cm) e também para a sucessão soja/milho + braquiária nas camadas de 30-40 e 40-50 cm de profundidade (Quadro 9), resultado que pode estar associado a menor macroporosidade encontrada nos solos envolvendo esses tratamentos. De acordo com Tormena et al. (2002), a densidade do solo expressada pela relação entre a massa de solo seco e o volume do mesmo é inversamente proporcional a porosidade do solo, ou seja, a menor porosidade do solo, reflete no aumento de sua densidade.

Quadro 9. Densidade do solo em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	Densidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
	-----cm-----				
Pousio	1,44 A	1,49 A	1,47 A	1,46 A	1,42 A
Milho	1,36 A	1,48 A	1,53 A	1,50 A	1,43 A
Milho + braquiaria	1,33 A	1,39 B	1,41 B	1,43 A	1,41 A
Milheto	1,36 A	1,41 B	1,33 B	1,34 B	1,35 B
Milheto+C. <i>Ochroleuca</i>	1,35 A	1,42 B	1,35 B	1,36 B	1,34 B
Aveia branca	1,37 A	1,40 B	1,36 B	1,34 B	1,35 B
Ervilhaca	1,34 A	1,37 B	1,34 B	1,36 B	1,33 B
Nabo forrageiro	1,29 A	1,38 B	1,41 B	1,39 B	1,36 B
CV (%)	6,93	3,58	4,70	4,42	3,32
Média	1,35	1,42	1,40	1,40	1,37

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; *C. Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

Silva (2003), indica que para Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa os valores de densidade desejáveis devem estar em $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ ou menos. Valores muito próximos e abaixo desse limite crítico encontrados nos tratamentos envolvendo sistemas de rotação de culturas, em que há ausência de revolvimento profundo do solo há quase dez anos, demonstram a eficiência e sustentabilidade do sistema de plantio direto por longos períodos quando manejado de forma correta.

O aporte contínuo de matéria orgânica em sistemas de rotação de culturas correlaciona-se inversamente com a densidade do solo e diretamente com a sua macroporosidade (SILVEIRA NETO et al., 2006), por isso, é primordial a adoção de um manejo de rotação de diferentes espécies vegetais na mesma área aliado a culturas que

forneçam adequada quantidade de resíduos que contribuam para o aumento e manutenção da matéria orgânica no solo.

Sabe-se que o aumento no teor de matéria orgânica, ocasiona redução na densidade do solo, devido aos efeitos na estabilidade estrutural do mesmo e também pelo material orgânico apresentar densidade menor que as partículas texturais do solo (BRAIDA et al., 2006). Em geral, o incremento de 1% do carbono orgânico pode reduzir 11% a densidade do solo máxima (KRZIC et al., 2003). A rotação de culturas com diferentes espécies e a variabilidade das raízes no perfil do solo ao longo de nove anos consecutivos, por consequência o aporte de matéria orgânica no sistema, influenciou diretamente na diminuição dos valores de densidade do solo encontrados nas camadas de 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm no presente estudo.

O quadro 10 indica que a adoção de um manejo de rotação de culturas também influenciou significativamente nos valores de resistência à penetração do solo, principalmente na camada de 20-30 cm de profundidade, com menores valores nas rotações envolvendo milheto (2,30 MPa), aveia branca (2,31 MPa), milheto + *C. ochroleuca* (2,36 MPa) e ervilhaca (2,62 MPa). Valores significativamente maiores do que os tratamentos citados para a mesma profundidade avaliada, foram encontrados na rotação envolvendo nabo forrageiro (2,71 MPa) e nas sucessões soja/milho + braquiaria (2,76) e soja/pousio (2,84), que representaram níveis de resistência à penetração do solo menores apenas do que na sucessão soja/milho safrinha com 3,22 MPa na camada de 20-30 cm de profundidade.

Quadro 10. Resistência do solo à penetração em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm de profundidade no ano de 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	Resistência do solo à penetração (MPa)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
	-----cm-----				
Pousio	1,60 B	2,44 A	2,84 B	2,88 A	2,74 A
Milho	2,66 A	2,36 A	3,22 A	3,10 A	2,79 A
Milho + braquiaria	1,44 B	2,09 B	2,76 B	2,77 A	2,60 A
Milheto	1,35 B	1,91 B	2,30 C	2,33 A	2,07 A
Milheto+ <i>C. Ochroleuca</i>	1,40 B	1,96 B	2,36 C	2,44 A	2,17 A
Aveia branca	1,47 B	1,89 B	2,31 C	2,43 A	2,17 A
Ervilhaca	1,43 B	1,99 B	2,62 C	2,66 A	2,31 A
Nabo forrageiro	1,37 B	1,92 B	2,71 B	2,67 A	2,33 A
CV (%)	11,74	12,99	9,30	12,42	16,74
Média	1,59	2,07	2,65	2,66	2,40

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%; *C. Ochroleuca*: *Crotalaria Ochroleuca*; CV: Coeficiente de variação.

Na camada de 10-20 cm de profundidade do solo os maiores valores em resistência do solo à penetração se mantiveram nas sucessões soja/pousio (2,44 MPa) e soja/milho safrinha (2,36 MPa) e na camada superficial (0-10 cm), estatisticamente o maior valor encontrado desta variável foi observado somente no tratamento que envolveu a sucessão soja/milho safrinha (2,66 MPa). Nas demais profundidades avaliadas não houveram diferenças significativas entre os tratamentos (Quadro 10).

Vale ressaltar que até a profundidade de 20 cm, entre os tratamentos que envolveram rotação de cultura, nenhum apresentou níveis de resistência a penetração do solo acima de 2 MPa e todos os valores encontrados, estão abaixo do limite crítico para o sistema de plantio direto proposto por Moraes et al. (2014) de 3,5 MPa. Todavia, no presente estudo a prática do plantio direto em aspectos temporais, se aproxima do início da fase de consolidação (PASSOS et al., 2018; SÁ et al., 2019), sendo necessária a continuidade do estudo em períodos posteriores, afim de identificar a sustentabilidade e longevidade de cada sistema adotado.

Calonego e Rosolem (2010), afirmam que a adoção de um sistema de rotação de culturas com espécies de sistema radicular profundo e agressivo, gradualmente aumenta a presença de bioporos ao longo do perfil e diminuem a resistência do solo à penetração, os autores afirmam que a adoção desse sistema pode substituir operações mecânicas de descompactação a exemplo de uma escarificação do solo. O presente estudo mostra que ao longo do tempo, a utilização de diferentes espécies cultivadas em rotação na mesma área, influenciam a sustentabilidade e longevidade do sistema na qualidade física do solo, visto que nos tratamentos em que foi adotado a rotação de culturas e a sucessão soja / milho + braquiária, houve a manutenção de menores níveis encontrados de resistência do solo à penetração (Quadro 10), mesmo após 9 anos do início do experimento.

Com valores em torno de 40% menores para o diâmetro médio geométrico (DMG) com 2,03 mm de 0-10 cm e 1,49 mm de 10-20 cm de profundidade o cultivo sucessivo soja/pousio foi o que obteve os menores valores nestas avaliações, da mesma forma foi o tratamento que, nas duas camadas de profundidade, apresentou os menores níveis de matéria orgânica do solo com 27,92 g kg⁻¹ de 0-10 cm e 22,68 g kg⁻¹ de 10-20 cm (Quadro 11).

Ainda para a matéria orgânica na camada superficial, os valores desta variável foram estratificados com maiores níveis em rotações envolvendo nabo forrageiro (36,66 g kg⁻¹), ervilhaca (34,96 g kg⁻¹) e aveia branca (33,80 g kg⁻¹), seguidos dos tratamentos

milheto + *C. ochroleuca* (32,28 g kg⁻¹), milho + braquiaria (32,13 g kg⁻¹), milheto (31,54 g kg⁻¹) e milho (30,87 g kg⁻¹) que não tiveram diferenças estatísticas entre os mesmos (Quadro 11).

Quadro 11. Diâmetro médio geométrico (DMG) e matéria orgânica (MO) em sistemas de sucessões e rotações de culturas nas camadas de 0-10, 10-20 cm de profundidade avaliadas em 2018. Dourados, MS.

Tratamentos	0-10 cm		10-20 cm	
	DMG (mm)	MO (g kg ⁻¹)	DMG (mm)	MO (g kg ⁻¹)
Pousio	2,03 B	27,92 C	1,49 B	22,68 C
Milho	2,79 A	30,87 B	2,37 A	24,08 C
Milho + braquiaria	3,40 A	32,13 B	2,20 A	25,75 B
Milheto	3,24 A	31,54 B	2,17 A	25,65 B
Milheto + <i>C. Ochroleuca</i>	2,93 A	32,28 B	2,29 A	25,43 B
Aveia branca	3,28 A	33,80 A	2,68 A	27,54 A
Ervilhaca	3,10 A	34,96 A	2,56 A	28,02 A
Nabo forrageiro	3,80 A	36,66 A	2,41 A	27,23 A
CV (%)	11,80	6,95	10,85	4,40
Média	3,07	32,52	2,27	25,80

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5%; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; MO: Matéria orgânica; CV: Coeficiente de variação.

Na camada de 10-20 cm de profundidade as maiores concentrações de matéria orgânica do solo também foram encontradas para as rotações envolvendo nabo forrageiro (27,23 g kg⁻¹), ervilhaca (28,02 g kg⁻¹) e aveia branca (27,54 g kg⁻¹), valores significativamente maiores que a sucessão soja/milho + braquiária (25,75 g kg⁻¹) e as rotações com milheto (25,65 g kg⁻¹) e milheto + *C. ochroleuca* (25,43 g kg⁻¹). Na mesma profundidade, juntamente com o tratamento pousio, a sucessão soja/milho safrinha apresentou o menor valor de matéria orgânica com 24,08 g kg⁻¹ (Quadro 11).

Portanto, comparado a sucessão soja / pousio, constatou-se maior agregação do solo em todos os demais tratamentos, que em comum tiveram o cultivo de espécies no outono/inverno, para cobertura do solo ou a sucessão com o milho desde o início do experimento em 2009. Isso contribuiu para os maiores teores de matéria orgânica, correspondendo a maior agregação do solo nesses sistemas.

Concomitantemente ao presente estudo a relação positiva entre agregação e estabilidade de agregados com carbono orgânico no solo foi observada por Hickmann et al. (2011). Os autores também observaram que a ação dos sistemas radiculares em maiores quantidades nos tratamentos em que houveram cultivos de outono/inverno, contribuiu efetivamente na agregação, atuando na aproximação das partículas minerais

pela pressão exercida em seu desenvolvimento por meio dos espaços porosos do solo, liberando exsudados orgânicos que favoreceram a coesão entre as partículas e influenciaram na estabilidade dos agregados do solo.

Em média houve reduções de mais de 20% nas variáveis relacionadas a agregação do solo dentre as profundidades, com 3,07 e 2,27 mm de diâmetro médio geométrico para as camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade do solo respectivamente. Na mesma magnitude a matéria orgânica teve redução na camada de 10-20 cm ($25,80 \text{ g kg}^{-1}$) em comparação com 0-10 cm de profundidade ($32,52 \text{ g kg}^{-1}$), demonstrando novamente a notória relação positiva entre os teores de matéria orgânica com o tamanho dos agregados do solo (Quadro 11).

Portanto, os resultados dos atributos físicos do solo obtidos no presente estudo evidenciam que a adoção da prática de rotação de cultura em sistema de plantio direto, ao longo do tempo, contribui no aumento dos níveis de matéria orgânica do solo e por consequência traz melhorias em sua porosidade, densidade, estrutura e agregação, propiciando um estado físico adequado, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas de interesse econômico inseridas no sistema de produção, a exemplo da soja.

4.4. Características agronômicas da soja

Avaliando a altura de plantas (Quadro 12), observaram-se reduções significativas no porte das plantas de soja que foram cultivadas nos sistemas de sucessões soja / pousio, soja / milho e soja / milho + braquiária na safra 2018/29 e nas sucessões soja / pousio e soja / milho na safra 2019/20, sistemas esses, principalmente para a soja / pousio e soja / milho, apresentaram certo grau de degradação dos atributos físicos do solo em relação aos tratamentos que envolveram rotação de culturas (Quadros 6, 8, 9, 10 e 11) ao longo de nove anos consecutivos. Andrade e Stone (2009), afirmam que o estado físico do solo, pode influenciar na disponibilidade de água para as plantas, taxa de difusão de oxigênio e resistência do solo à penetração de raízes, e em condições inadequadas, tais fatores podem limitar significativamente o crescimento e desenvolvimento das plantas.

A altura de inserção da primeira vagem não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos em ambas as safras do presente estudo (Quadro 12), e todos os valores encontrados estão na faixa adequada para colheita mecanizada segundo Balbinot Junior et al. (2015). A diferença numérica na altura de plantas de soja, com plantas de porte menor na safra 2018/19 em relação à safra 2019/20 (Quadro 12), deve-se ao menor desenvolvimento vegetativo das mesmas, principalmente devido a maior irregularidade

das chuvas na primeira safra de cultivo. Apesar do maior volume pluviométrico da safra 2018/19 (645 mm) em relação à safra 2019/20 (631 mm), a ocorrência de dois períodos de veranico, o primeiro com uma estiagem de 10 dias durante os estádios iniciais da cultura e posteriormente próximo a transição da fase vegetativa para a reprodutiva a ausência de chuvas durante 15 dias, afetou significativamente o crescimento por consequência a altura das plantas de soja cultivadas na safra 2018/19. Por outro lado, mesmo com menor volume pluviométrico a safra 2019/20 foi caracterizada por uma adequada distribuição de chuvas ao longo do ciclo da soja.

Quadro 12. Altura de plantas (AP) e altura da inserção da primeira vagem (AIPV) de soja em sistemas de sucessões e rotações de culturas, safras 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.

Tratamentos	Safra 2018/19		Safra 2019/20	
	AP	AIPV	AP	AIPV
	-----cm ⁻¹ -----			
Pousio	98,05 B	14,05 A	100,19 B	19,06 A
Milho	99,65 B	15,10 A	107,27 B	20,33 A
Milho + braquiaria	100,80 B	14,70 A	112,00 A	21,28 A
Milheto	104,75 A	16,05 A	115,40 A	20,53 A
Milheto + <i>C. Ochroleuca</i>	105,80 A	14,75 A	116,50 A	21,13 A
Aveia branca	105,70 A	15,25 A	112,33 A	20,37 A
Ervilhaca	106,20 A	16,35 A	119,75 A	20,13 A
Nabo forrageiro	106,70 A	16,60 A	111,25 A	20,13 A
CV (%)	4,36	11,47	3,97	6,40
Média	103,46	15,35	111,84	20,37

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5%; AP: Altura de plantas; AIPV: Altura da inserção da primeira vagem; CV: Coeficiente de variação.

Menores médias foram observadas no número de vagens por planta para a soja no sistema de sucessão com milho e no tratamento pousio na safra 2018/19, não havendo diferenças significativas entre os tratamentos nesta variável para soja cultivada na safra 2019/20. Para a massa de mil grãos, todos os tratamentos que envolveram rotação de culturas, exceto para a rotação com milheto na safra 2018/19, apresentaram valores significativamente maiores que os sistemas de cultivo sucessivo (Quadro 13). Observa-se que a menor massa de mil grãos refletiu negativamente na produtividade da soja, pois os tratamentos que apresentaram significativamente a menor produtividade foram os cultivos sucessivos na safra 2019/20 e na safra 2018/19, da mesma forma que as menores produtividades foram encontradas nos sistemas de sucessão de culturas e na rotação com o milheto (Quadro 14).

Quadro 13. Número de vagens (NV) e massa de 1000 grãos (M1000) de soja em sistemas de sucessões e rotações de culturas, safra 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.

Tratamentos	Safra 2018/19		Safra 2019/20	
	NV (vag. pl. ⁻¹)	M1000 (gramas ⁻¹)	NV (vag. pl. ⁻¹)	M1000 (gramas ⁻¹)
Pousio	74,25 B	112,90 B	62,50 A	117,00 B
Milho	75,80 B	113,05 B	66,65 A	117,41 B
Milho + braquiaria	85,40 A	111,50 B	65,30 A	121,73 B
Milheto	86,60 A	113,40 B	70,30 A	134,68 A
Milheto + <i>C. Ochroleuca</i>	87,05 A	121,05 A	73,90 A	138,89 A
Aveia branca	81,60 A	124,20 A	68,40 A	135,06 A
Ervilhaca	83,80 A	124,75 A	71,75 A	140,21 A
Nabo forrageiro	86,50 A	120,45 A	70,55 A	135,73 A
CV (%)	7,94	5,27	10,60	7,50
Média	82,63	117,66	68,67	130,09

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5%; NV: Número de vagens; M1000: Massa de 1000 grãos; CV: Coeficiente de variação.

O número de vagens por plantas de soja na safra 2018/19, foi numericamente maior do que na safra 2019/20, sendo essa uma característica intrínseca de cada cultivar, porém que pode ser influenciada pela densidade de plantas na área (HEIFFIG et al., 2005). O estande de plantas na safra 2018/19 foi de 18% menor em relação à safra 2019/20, o que pode ter influenciado no maior número de ramos reprodutivos das plantas, por consequência no maior número de vagens por planta. Comportamento semelhante foi observado por Souza et al. (2010), o qual sugerem alteração na relação fonte-dreno em diferentes estandes, porém isso não influenciou na produtividade. Kuss et al. (2008) e Balbinot Junior et al. (2015) constataram que de maneira geral, as espécies possuem mecanismos de compensação de menores populações pelo maior número de vagens por planta, e isso é característico da cultura da soja.

Menores valores para a massa de mil grãos de soja foram encontrados na safra 2018/19, esse resultado pode estar associado a maior quantidade de grãos por planta, já que o número de vagens foi maior na referida safra (Quadro 13). O mesmo comportamento foi constatado por Perini et al., (2012), o qual estudando os componentes de produção de soja de cultivares de hábito de crescimento determinado e indeterminado, observaram que o aumento no número de grãos por planta diminui a massa individual dos mesmos. Isso pode estar relacionado com o maior número de drenos na planta para a mesma quantidade de carboidratos e fotoassimilados produzidos na fase de enchimento de grãos.

Outro fator que interferiu na massa de mil grãos, da mesma forma a produtividade da cultura da soja na safra 2018/19, foi o regime hídrico. Conforme anteriormente citado os dois períodos de veranicos da primeira safra juntos somaram 25 dias de restrição hídrica durante fases importantes do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura. Na safra 2019/20 a boa distribuição de chuvas ao longo do ciclo da cultura refletiu em um aumento de 20% na produtividade de grãos de soja em relação à safra 2018/19 (Quadro 14). Entretanto, vale ressaltar que em ambos as safras a produtividade de soja do presente estudo, em todos os tratamentos foi superior à média do estado de Mato Grosso do Sul, que na safra de 2018/19 foi de 2980 kg ha⁻¹ (CONAB, 2019) e na safra 2019/20 alcançou 3530 kg ha⁻¹ (CONAB, 2020).

Quadro 14. Produtividade de grãos de soja em sistemas de sucessões e rotações de culturas, safra 2018/19 e 2019/20. Dourados, MS.

Tratamentos	Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	
	Safra 2018/19	Safra 2019/20
Pousio	3372,34 B	3980,11 C
Milho	3438,95 B	4243,09 C
Milho + braquiaria	3382,88 B	4278,84 C
Milheto	3523,28 B	4725,35 B
Milheto + <i>C. Ochroleuca</i>	4071,06 A	4937,62 A
Aveia branca	4205,17 A	4637,66 B
Ervilhaca	4199,49 A	4924,83 A
Nabo forrageiro	4135,19 A	4710,18 B
CV (%)	7,33	3,73
Média	3791,04	4555,71

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5%; CV: Coeficiente de variação.

Na safra 2018/19, com exceção do tratamento envolvendo milheto, as maiores produtividades de soja foram alcançadas nos sistemas de rotação de culturas (Quadro 14), apresentando valores em média 20% maiores das rotações com aveia branca (4205,17 kg ha⁻¹), ervilhaca (4199,49 kg ha⁻¹), nabo forrageiro (4135,19 kg ha⁻¹) e milheto + *C. Ochroleuca* (4017,06 kg ha⁻¹) em relação aos tratamentos com milheto (3523,28 kg ha⁻¹), milho (3438,95 kg ha⁻¹), milho + braquiária (3382,88 kg ha⁻¹) e pousio (3372,34 kg ha⁻¹).

Para a segunda safra do presente estudo (2019/20), as maiores produtividades de grãos de soja foram observadas para as rotações envolvendo milheto + *C. ochroleuca* (4937,63 kg ha⁻¹) e ervilhaca (4924,83 kg ha⁻¹), seguidas das rotações com milheto (4723,35 kg ha⁻¹), nabo forrageiro (4710,18 kg ha⁻¹) e milheto (4725,35 kg ha⁻¹), e por fim com os menores valores nessa variável, as sucessões de soja e milho + braquiária,

milho safrinha e pousio com produtividades de 4278,84 kg ha⁻¹, 4243,09 kg ha⁻¹ e 3980,11 kg ha⁻¹ de grãos de soja respectivamente (Quadro 14).

Conforme visto, os tratamentos que apresentaram os melhores resultados em produtividade, com exceção para o tratamento milheto na safra 2018/19, estão entre os sistemas de plantio direto que possuem um histórico de rotação de culturas desde o início do experimento, no ano de 2009. Da mesma forma, são os tratamentos que apresentaram melhor qualidade dos atributos físicos do solo, dentre os quais, os menores valores de resistência do solo à penetração (Quadro 10), o que pode ter influenciado de forma positiva no desenvolvimento radicular dos referidos tratamentos, por consequência, aumentando a capacidade de absorção de água e nutrientes para as plantas e inferindo em sua produtividade.

As espécies vegetais cultivadas no outono/inverno em rotação com a soja e o milho, trouxeram benefícios aos sistemas estudados, refletindo em maiores patamares produtivos na cultura da soja. A diversificação de culturas em sistemas de rotação, trouxe consigo vantagens inerentes a cada espécie, como a maior fixação de nitrogênio atmosférico proporcionado pelas leguminosas crotalária e ervilhaca, ciclagem de nutrientes, a exemplo do potássio pelo milheto (CAZETTA et al., 2005), efeito alelopático da aveia branca (GAZZIERO et al., 2010) e formação de bioporos no solo pelo desenvolvimento agressivo das raízes do nabo forrageiro (BARROS; JARDINE, 2013).

Os efeitos da utilização da rotação de culturas em plantio direto também são atribuídos ao aumento da atividade microbiológica do solo favorecendo a macro e microfauna edáfica. A manutenção e incremento nos níveis de matéria orgânica do solo em sistema de plantio direto, ocorre pela adoção de um manejo de rotação de culturas ao longo do tempo, por meio do aporte anual da palhada de diferentes culturas no sistema de produção, constrói-se um ambiente favorável a cultura da soja e os resultados já obtidos safra após safra no presente experimento, mostram que os fatores inerentes ao manejo das culturas em rotação e tempo são essenciais na sustentabilidade do sistema de produção e na manutenção de elevados patamares produtivos da soja.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo comprova que sistemas agrícolas envolvendo rotações de culturas e de sucessão soja/milho + braquiária, são mais eficientes no aporte de biomassa e por consequência na manutenção de maiores teores de matéria orgânica do solo em relação a sucessão soja/milho safrinha e monocultivo de soja.

Sistemas de rotação de culturas e de sucessão soja/milho + braquiária, preservam a qualidade física do solo por aumentarem sua agregação, os níveis de macroporosidade e porosidade total, além de reduzirem os valores de densidade e resistência do solo à penetração em relação a sucessão soja/milho safrinha e o monocultivo de soja.

As maiores produtividades de soja são obtidas nos sistemas que envolvem rotações de culturas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017. p. 361-367. cap. 7.

ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.

ALVARENGA, R. C.; COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; WRUCK, F. J.; CRUZ, J. C.; GONTIJO NETO, M. M. **A cultura do milho na integração lavoura-pecuária**, Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 13 p.

ALVES, D. F.; FRANCO JUNIOR, K. S.; BRIGANTE, G. P.; DIAS, M. S.; FERREIRA, N. S. Efeitos de diferentes fontes de material orgânico na fertilidade e umidade do solo, **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 4, p. 644-659, 2021. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n4p644-659>

ALVES, V. B.; PADILHA, N. S.; GARCIA, R. A.; CECCON, G. Milho consorciado com *Urochloa ruziziensis* e produtividade da soja em sucessão, **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 13, p. 280-292, 2013. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v12n3p280-292>

ANDERSON, R. L. Improving resource-use-efficiency with no-till and crop diversity, **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 1, n. 2, p. 1-4, 2016. <http://dx.doi.org/10.1017/S1742170516000090>

ANDRADE, R. S.; STONE L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 14, p. 382-388, 2009.

ANDRADE, R. S.; STONE L. F.; SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 411-418, 2009.

ANDRIOLI, I.; PRADO, R. M. Plantas de cobertura em pré-safra e adubação nitrogenada na fertilidade do solo em diferentes camadas, cultivado com milho em sistema de plantio direto e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 963-978, 2012. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n3p963>

ANGELETTI, M. P.; SOUZA, J. L.; COSTA, H.; FAVARATO, L. F.; MUZZI, E. M.; MUNIZ, E. S.; LAURETT, L.; ZANUNCIO JUNIORM J. S.; GUARÇONIM A. **Espécies vegetais para cobertura do solo: guia ilustrado**. Vitória: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, 2018. 78 p.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: Uma introdução**. 2.ed. Santa Maria: Pallotti, 2006. 100p.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. **Densidade de plantas na cultura da soja**, Londrina: Embrapa Soja, 2015. 38 p.

BALOTA, E. L. Manejo e a Qualidade Microbiana do Solo. In: BALOTA, E. L. **Manejo e Qualidade Biológica do Solo**. Londrina: Mecenias, 2017. p. 89-204.

BARROS, T. D.; JARDINE, J. G. **Nabo forrageiro**. Árvore do conhecimento: Agroenergia. Embrapa: Agência de Informação Tecnológica. 2013. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn002wx5eo0sawqe38tspejq.html>> Acesso em: 19 agosto de 2021.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; SOUZA C. M. A.; SOUZA F. R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 45, n. 3, p. 299-305, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300010>

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 208-218, 2019. <https://doi.org/10.36812/pag.2019253208-218>

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto. **Agrária**, v. 10, n. 1, p. 34-42, 2015. <http://dx.doi.org/10.5039/ agraria.v10i1a4513>

BORGES, W. L. B.; SOUZA, I. M. D.; SÁ, M. E.; ALVES, M. C. Alterações físicas em Latossolos cultivados com plantas de cobertura em rotação com soja e milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 3, p. 149-155, 2016. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v11i3a5380>

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v6i2a882>

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 398p.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 242-249, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2010.06.002>

CANALLI, L. B. S.; BORDIN, I. Rotação de culturas. In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOZA, G. M. C.; SANTOS, J. B.; GUIMARÃES, M. F. (Org.). **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 129-132.

CANALLI, L. B. S.; CONCEIÇÃO, P. C.; CASSOL, C. Produção de biomassa. In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOZA, G. M. C.; SANTOS, J. B.; GUIMARÃES, M. F. (Org.). **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 133-137.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4., p. 274-289, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **Plantio Direto no Sul do Brasil: Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista**. Londrina, PR: IAPAR, 2012. 77p.

CAZETTA, D. A.; FORNASIERI FILHO, D.; GIROTTO, F. Composição, produção de matéria seca e cobertura do solo em cultivo exclusivo e consorciado de milho e crotalária. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 4, p. 575-580, 2005. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v27i4.1298>

CECCON, G.; STAUT, L. A.; SAGRILO, E.; MACHADO, L. A. Z.; NUNES, D. P.; ALVES, V. B. Legumes and forage species sole or intercropped with corn in soybean-corn succession in midwestern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 204-212. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100021>

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Grãos, Safra 2018/2019. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Boletim de grãos, maio 2019. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=20>> Acesso em: 17 de outubro, 2021.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Grãos, Safra 2019/2020. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Boletim de grãos, dezembro 2020. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?limitstart=0>> Acesso em: 17 de agosto, 2021.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Grãos, Safra 2021/2022. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Segundo levantamento, fevereiro 2022. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> Acesso em: 16 de fevereiro, 2022.

CONYERS, M.; RIJT, V. V. D.; OATES, A.; POILE, G.; KIRKEGAARD, J. A.; KIRKBY, C. The strategic use of minimum tillage within conservation agriculture in southern New South Wales, Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 17-26, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.021>

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; MATRANGOLO, W. J. R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. **Cultivo do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 10 p.

DA ROS, C. O.; AITA, C. Efeito de espécies de inverno na cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 1, p. 135-140, 1996.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Homogeneity of the Physical Quality of the Soil between the Lines of an Orange Orchard with Permanent Vegetation Management Systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 637-645, 2007.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017. p. 361-367. cap. 1.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importancia da rotação de culturas para a produção sustentável no Paraná**. Londrina: Documentos Embrapa Soja, 52 p., 2011.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H. **Rotação de culturas: prática que confere maior sustentabilidade a produção agrícola no Paraná**. Piracicaba: Informações Agronômicas, 2011. n. 134.

FRANCHINI, J. C.; HOFMMAN-CAMPO, C. B.; TORRES, E. C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organica Composition of green manure durin growth and its effect on cation mobilization in Acid Oxissol. **Communication in Soil Science and Planta Analysis**. v. 34, p. 2045-2058, 2003. <https://doi.org/10.1081/CSS-1200232>

FRANCHINI, R. G. **Rotação de culturas com oleaginosas e gramíneas na produção de soja e milho**. 2014. 99f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

GARCIA, J. C.; BONETI, J. E. B.; AZANIA, C. A. M.; BELUCI, L. R.; VITORINO, R. Fontes de adubação potássica na lixiviação de potássio em neossolo quartzarênico. **Revista Eletrônica Thesis**, v. 25, p. 76-89, 2015.

GAZZIERO, D. L. P.; ADEGAS, F. S.; VOLL, E.; VARGAS, L.; FORNAROLLI, D.; KARAM, D.; CERDEIRA, A. L.; MATALO, M.; OSIPEM R.; ZOIAM L.; SPENGLER, A. N. Manejo de buva em áreas cultivadas com milho safrinha e aveia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 27. 2010, **Anais**, Ribeirão Preto, Brasil, 2010. p. 1564-1569.

GOMES, D. O.; RODRIGUES, C. A.; COSTA, A. N.; ALMEIDA, L. B.; FERNANDES, F. P. S.; PONTES JUNIOR, V. B.; SATO, M. K.; VIEIRA, D. C.; PEDROSO, A. J. S.

Efeito de diferentes níveis de compactação sobre a porosidade, micro e macroporosidade em solos de textura distintas. In: AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M. (Org.) **Ensaio nas ciências agrárias e ambientais 5**. Ponta Grossa: Atena, 2019. p. 83-88. cap. 9.

GONÇALVES, V. A.; MELO, C. A. D.; ASSIS, I. R.; FERREIRA, L. R.; SARAIVA, D. T. Biomassa e atividade microbiana de solo sob diferentes distemas de plantio e sucessões de culturas. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, p. 1-8, 2019. <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.2611>

GUBIANI, P. I.; LIER, Q. J. V.; DRESCHER, M. S.; MEZZOMO, H. C.; VEIGA, C. M. C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 100-108, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150317>

HEIFFIG, L. S.; CAMARA, G. M. S.; MARQUES, L. A.; PEDROSO, D. B.; PIEDADE, S. M. S. Plasticidade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes arranjos espaciais. **Revista de Agricultura**, v. 80, n. 2, p. 188-212, 2005. <https://doi.org/10.37856/bja.v80i2.3972>

HEINRICH, R.; AITA, C.; AMADO, T. J. C.; FANCELLI, A. L. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: relação c/n da fitomassa e produtividade do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 331-340, 2001.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, R. B. A. Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um argissolo vermelho-amarelo sob diferentes manejos de longa duração e mata atlântica secundária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 2191-2198, 2011.

INDORIA, A. K.; SRINIVASA, R. C. H.; SHARMA, K. L.; SAMMI, R. K. Conservation agriculture – a panacea to improve soil physical health. **Current Science**, v. 112, n.1, p. 52-61, 2017. <https://doi.org/10.18520/cs/v112/i01/52-61>

JIMENEZ, R. L.; WAINER, G. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 116-121, 2008.

KEMPER, W.D; ROSENAU, R.C, Aggregate stability and size distribution, In: KLUTE, A., **Methods of soil analysis**, 2, ed, Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p, 425-441, 1986.

KODZWA, J. J.; GOTOSA, J.; NYAMANGARA, J. Mulching is the most important of the three conservation agriculture principles in increasing crop yield in the short term, under sub humid tropical conditions in Zimbabwe. **Soil & Tillage Research**, v. 197, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104515>

KONDO, M. K.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; WENDLING, B., SILVA, P. B.; CARDOSO, M. M. Effect of Plant Cover on Soil Physical Attributes and Agronomic Characteristics of Sorghum. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 33-40. 2012.

KÖEPPEN, W. **Climatologia: com um estúdio de los climas de la tiera**. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478 p.

KUSS, R. C. R.; KÖNIG, O.; DUTRA, L. M. C.; BELLÉ, R. A.; ROGGIA, S.; STURNER, G. R. Populações de plantas e estratégias de manejo da irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1133-1137, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000400036>

KRZIC, M.; BULMER, C.; TESTE, F.; RAHMAN, S.; DAMPIER, L. **Relative measure of bulk density to characterize compaction of forest soils caused by harvest**. Vancouver: UBC, 2003.45p.

LOPES, A. S.; GUIMARÃES, G. L. R. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in agronomy**. London: Academic Press, 2016. v. 137, p. 1-72.

MALÉZIEUX, E.; CROZAT, Y.; DUPRAZ, C.; LAURANS, M.; MAKOWSKI, D.; OZIER-LAFONTAINE, H.; RAPIDEL, B.; TOURDONNET, S.; VALANTION-MORISON, M. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. **Agronomy Sustainable**, v. 29, p. 43–62, 2009. <https://doi.org/10.1051/agro:2007057>

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I - Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1553-1567, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500020>.

MARIA, I. C.; BERTOL, I.; DRUGOWICH, M. I. Práticas conservacionistas do solo e da água In: BERTOL, I.; MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. (Org.). **Manual de manejo e conservação do solo e da água**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 527-587.

MARTINS, M. F. L. **Velocidade de decomposição da fitomassa do crambe em latossolo argiloso sob sistemas de manejo**. 2016. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. C.; GUIMARÃES, G. P.; MOURA, W. M.; ANDRADE, F. V. Biological nitrogen fixation by legumes and N uptake by coffee plants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 1, p. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160178>

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; YANO, E. H.; PEREIRA, F.C. B. L. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 183-193, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20150666>

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014.

MOTTER, P.; ALMEIDA, H. G. Plantio Direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira, Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015. 73 p.

MTYOUNG, M.; MUZANGWA, L.; MNKENI, P. N. S. Tillage and crop rotation effects on soil carbon and selected soil physical properties in a Haplic Cambisol in Eastern Cape, South Africa. **Soil and Water Research**, v. 15, n. 1, 47-54, 2020. <https://doi.org/10.17221/176/2018-SWR>

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 85-91, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.02.007>

NEUGSCHWANDTNER, R. W.; LIEBHARD, P.; KAUL, H. P.; WAGENTRISTL, H. Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. **Plant, Soil and Environment**, v. 60, n. 2, p. 57-62, 2014. <https://doi.org/10.17221/879/2013-PSE>

NUNES, A. L. P.; PIT, E.; RALISCH, R. Compactação em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 6, n. especial, p. 104-113, 2017.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, v. 259, p. 149-150, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.003>

OLIVEIRA NETO, A. A. A produtividade da soja: análise e perspectivas. **Compêndio de estudos Conab**, v.10, p. 1 – 35, 2017.

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 619-626, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200026>

ORTIZ, J. A. M. **Propriedades físicas do solo em sistema plantio direto: associação com a produtividade da soja e variações em relação à mata nativa**. 2019. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. D. A.; ASSIS, R. L. D.; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Produção e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1787-1799, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500033>

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.32, n. 3, p. 911-920, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-0683200800030000>

PASSOS, A. M. A.; ALVARENGA, R. C.; SANTOS, F. C. Sistema de Plantio Direto. In: NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I. R. (Org.). **Agricultura de Baixo Carbono**. Brasília: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. p. 62-105. cap. 3.

PERINI, L. J.; FONSECA JÚNIOR, N. S.; DESTRO, D.; PRETE, C. E. C. Componentes da produção em cultivares de soja com crescimento determinado e indeterminado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, suplemento 1, p. 2531-2544, 2012. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33Sup1p2531>

PISSINATI, A.; MOREIRA, A.; SANTORO, P. H. Biomass Yield and Nutrients Concentration in Shoot Dry Weight of Winter Cover Crops for No-Tillage Systems, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 20, p. 2292-2305, 2016. <https://doi.org/10.1080/001T03624.2016.1243711>

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, p. 1-24, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210104>

PRANDO, M. B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A. P. E.; ROSOLEM, C. A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 693-700, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300010>

RAIESI, F.; KABIRI, V. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. **Ecological Indicators**, v. 71, p. 198-207, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.061>

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 31, 1983, (Boletim técnico, 81).

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

RODRIGUES, R. B.; SÁ, M. E.; VALÉRIO FILHO, W. V., BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; PINA, T. Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivo e consorciado. **Revista Ceres**, v.59, n. 3, p. 380-385, 2012.

SÁ, J. C. M.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. B. S.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C. Manejo da matéria orgânica do solo (cobertura morta). In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOZA, G. M. C.; SANTOS, J. B.; GUIMARÃES, M. F. (Org.). **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 114-119.

SALTON, J. C.; KICHEL, A. N.; COSTA, A. R. Consórcio de milho com forrageiras na entressafra e atributos físicos e químicos do solo no Cerrado Brasileiro. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 19., CONGRESSO

ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 23. 2012, **Anais**, Mar del Plata, Argentina, 2012. v. 1. p. 1-6.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados: Comunicado Técnico 198, Embrapa. 2014. 6p.

SANTOS, H.; JACOMINE, P.; ANJOS, L.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M.; CUNHA, T. J. F. 2018. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**, 5nd ed., Brasília: Embrapa, 356 p.

SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina, Paraná: Mecenas, v. 1, 314p., 2009.

SILVA, A. G.; CRUCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura e cultivo da mamona em sucessão no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 40, n. 10, p. 2092-2098, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010001000007>

SILVA, C. F. da; PEREIRA, M. G.; MIGUEL, D. L.; FERNANDES, J. C. F.; LOSS, A.; MENEZES, C. E. G.; SILVA, E. M. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1680-1689, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600002>

SILVA, D. A.; SOUZA, L. C. F.; VITORINO, A. C. T.; GONÇALVES, M. C. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p.147-156, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100021>

SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, p. 1011-1020, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000300049>

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 192f. Tese (Doutorado em Agronomia – Biodinâmica do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

SILVEIRA JUNIOR, S. D.; DA SILVA, A. P.; FEIGUEIREDO, J. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Qualidade física de um latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600020>

SILVEIRA NETO, A. N. S.; SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; OLIVEIRAM L. F. C. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 29-35, 2006.

SOUZA, C. A.; GAVA, F.; CASA, R. T.; BOLZAN, J. M.; KUHNEM JUNIOR, P. R. Relação entre densidade de plantas e genótipos de soja roundup ready. **Planta daninha**, v. 28, n. 4, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000400022>

SPERA, S. T.; SANTOSM H. P.; TOMM, G. O.; KOCHHANN, R. A.; ÁVILA A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 1079-1093, 2009.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026>

TIEMANN, L. K.; GRANDY, A. S.; ATKINSON, E. E.; SPIOTTA, E. M.; DANIEL, M. D. M. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. **Ecology Letters**, v. 18, n. 8, p. 761-771, 2015. <https://doi.org/10.1111/ele.12453>

VALENTE, G. F.; SILVA, V. F. A.; SILVA, J. N.; PINTO, D. R. S.; GALVÃO, J. R. Resistência mecânica à penetração em sistemas de manejo do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 1, p. 140-145, 2019. <https://doi.org/10.18378/rvads.v14i1.5892>

VASU, D.; SINGH, S. K.; RAY, S. K.; DURAISAMI, V. P.; TIWARY, P. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid deccan plateau, India. **Geoderma**, v. 282, n. 15, p. 70-79, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>

WARD, P. S.; BELL, A. R.; DROPELMANN, K.; BENTON, T. Early adoption of conservation agriculture practices: Understanding partial compliance in programs with multiple adoption decisions. **Land Use Policy**, v.70, n. 1, p. 27-37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.001>

WILLIAMS, S.M; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1403-1409, 2004. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>

YODER, R, E, A. Direct method of aggregate analysis soils and a study of the physical nature of erosion losses, **Journal American Society Agronomy**, Madison, v, 28, p, 337-351, 1936