



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS ARAGUATINS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA**

WÉRIK BARROS DA SOLIDADE

**EFEITOS DE SISTEMAS DE USO E DE MANEJO SOBRE A DENSIDADE,
POROSIDADE E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE SOLOS LEVES: uma revisão**

**ARAGUATINS
2024**

WÉRIK BARROS DA SOLIDADE

**EFEITOS DE SISTEMAS DE USO E DE MANEJO SOBRE A DENSIDADE,
POROSIDADE E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE SOLOS LEVES: uma revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Agrônômica da Unidade Araguatins, do
Instituto Federal do Tocantins, como exigência à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Agrônômica.

Orientador: Prof. Me. Ruy Borges da Silva

ARAGUATINS
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S686e Solidade, Wérík Barros da
 Efeitos de sistemas de uso e de manejo sobre a densidade,
 porosidade e intervalo hídrico ótimo de solos leves : uma revisão /
 Wérík Barros da Solidade. – ARAGUATINS, TO, 2024.
 48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Agrônômica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Tocantins, Campus Araguatins, ARAGUATINS, TO, 2024.

Orientador: Me. Ruy Borges da Silva

1. Compactação do solo. 2. Faixa de água menos limitante. 3.
Qualidade física do solo. I. Silva, Ruy Borges da. II. Título.

CDD 630

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Campus Araguatins
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “EFEITOS DE SISTEMAS DE USO E DE MANEJO SOBRE A DENSIDADE, POROSIDADE E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE SOLOS LEVES: UMA REVISÃO”

AUTOR: Wérik Barros da Solidade

ORIENTADOR: Prof. Me. Ruy Borges da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus Araguatins*, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica.

Aprovado em 05 de novembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Ruy Borges da Silva, Servidor**, em 05/11/2024, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Lopes de Alencar, Servidor**, em 05/11/2024, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Rogerio Pereira Leite, Servidor**, em 05/11/2024, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftoc.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2539785** e o código CRC **7730442A**.

Aos meus pais Estevam e Maria, aos meus
irmãos Deuvânio e Jailson, às minhas
sobrinhas Emmanuely e Yasmin, ao meu
tio Joelson (*In memoriam*) ...

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Estevam e à minha mãe Maria por sempre terem batalhado para que eu pudesse estudar. Reconheço que não me faltou apoio e incentivo.

Aos meus irmãos Deuvânio e Jailson, pelo amor fraterno, pela amizade, incentivo e amor incondicional. Gratidão por terem me conduzido até aqui.

Às minhas sobrinhas Emmanuely e Yasmin: vocês são minha maior motivação!

Aos meus tios, Itamar Barros e Tânio Lélío pelo incentivo, apoio e amizade.

Ao meu tio Joelson Barros (*In memorian*): seu apoio, incentivo e influência foram fundamentais na minha trajetória. Gratidão eterna!

Agradeço aos colegas de curso Brenno Allef e Guilherme Araújo pela parceria, pelas experiências compartilhadas e por terem me ajudado nos momentos de dificuldades. Desejo-lhes muito sucesso!

Ao colega Wandson Lima, pelos conselhos, pela paciência admirável e por não fugir do debate.

Ao meu orientador, Prof. Me. Ruy Borges da Silva, pela orientação, atenção e paciência.

Gratidão à assistente da biblioteca do *Campus* IFTO Araguatins, Lindamar Pereira, pela amizade, confiança, e por sempre ter me atendido com muita paciência e empatia.

Ademais, agradeço a todos os professores e servidores do IFTO *Campus* Araguatins que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.

Albert Einstein

RESUMO

A presente revisão sistemática tem como objetivo sintetizar informações relacionadas aos efeitos de sistemas de uso e de manejo sobre a densidade, porosidade e intervalo hídrico ótimo de solos leves, com vistas à definição de sistemas de manejo sustentáveis. Para o desenvolvimento da pesquisa realizou-se uma busca avançada de artigos científicos nas bases de dados Scopus e Scielo, utilizando-se termos e suas combinações por meio dos operadores booleanos OR (ou) e AND (e), no campo de buscas por título do artigo, resumo e palavras-chave. Restringiu-se os artigos àqueles provenientes de pesquisas experimentais desenvolvidas no território brasileiro, e publicados no período de 2000 a 2024. Selecionaram-se artigos cujos respectivos trabalhos de pesquisas foram conduzidos em solos de textura arenosa ou arenosa/média (teor de areia superior a 50%), e cuja temática envolve o preparo convencional, o sistema plantio direto, sistemas de pastagens integradas e não integradas, e a colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Constatou-se que, dependendo do sistema de uso e de manejo, a densidade, a porosidade e o intervalo hídrico ótimo de solos leves sofrem alterações em taxas e direções que podem comprometer o estado de conservação desses solos e sua capacidade produtiva. Sistemas de produção que envolvem a rotação de culturas, o uso de plantas de cobertura com sistema radicular profundo associado às práticas mecânicas, favorecem a redução da densidade, aumento da porosidade e do intervalo hídrico ótimo. O manejo adequado visando incrementar os teores de matéria orgânica, o controle do tráfego de máquinas e o ajuste da taxa de lotação animal em função da oferta de forragem, são estratégias de manejo que podem manter os benefícios associados à adoção de sistema plantio direto e de sistemas de produção integrada em solos leves.

Palavras-chave: compactação do solo; faixa de água menos limitante; qualidade física do solo; solos arenosos.

ABSTRACT

The present systematic review aims to synthesize information related to the effects of use and management systems on the density, porosity and optimal water range of light soils, with a view to defining sustainable management systems. To develop the research, an advanced search for scientific articles was carried out in the Scopus and Scielo databases, using terms and their combinations using the Boolean operators OR (or) and AND (and), in the title search field of the article, abstract and keywords. The articles were restricted to those originating from experimental research carried out in the Brazilian territory, and published in the period from 2000 to 2024. Articles were selected whose respective research work was conducted in soils with a sandy or sandy/medium texture (sand content greater than 50%), and whose theme involves conventional tillage, the direct planting system, integrated and non-integrated pasture systems, and mechanized sugarcane harvesting. It was found that, depending on the use and management system, the density, porosity and optimal water range of light soils undergo changes at rates and directions that can compromise the conservation status of these soils and their productive capacity. Production systems that involve crop rotation, the use of cover crops with deep root systems associated with mechanical practices, favor the reduction of density, increased porosity and the optimal water range. Adequate management aimed at increasing organic matter levels, controlling machine traffic and adjusting the animal stocking rate depending on the forage supply are management strategies that can maintain the benefits associated with the adoption of a direct planting system and integrated production systems in light soils.

Keywords: soil compaction; least limiting water range; soil physical quality; sandy soils.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo	23
Figura 2 – Densidade de um Planossolo sob pastagem, antes e após pastejo contínuo de curta duração	27
Figura 3 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) na camada de 0,00 a 0,10 m de um Latossolo Vermelho distrófico sob vegetação nativa (A) e preparo convencional (B)	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade média de um Latossolo Vermelho-Amarelo em três profundidades e três sistemas de manejo da palhada de cana-de-açúcar	29
Tabela 2 – Médias mais erro padrão de porosidade total (PT), Macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas integrados de pastagens e não integrados	34
Tabela 3 – Porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) na camada de 0,00 a 0,10 m de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de preparo do solo na reforma de canavial e manejo de tráfego de máquinas	35
Tabela 4 – Porosidade total, macroporosidade e microporosidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo em três profundidades e três sistemas de manejo da palhada de cana-de-açúcar	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	METODOLOGIA	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Definições e características de solos leves	15
3.2	Sistemas de uso e de manejo e seus impactos sobre a qualidade física do solo	16
3.3	Indicadores de qualidade física do solo	20
3.4	Densidade de solos leves sob sistemas de uso e de manejo	24
3.5	Porosidade de solos leves sob sistemas de uso e de manejo	30
3.6	Intervalo hídrico ótimo de solos leves sob sistemas de uso e de manejo ..	36
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de aumentar a produção de alimentos para uma população crescente (SANTOS *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2020) levou à incorporação ao processo produtivo de extensas áreas de solos leves no Brasil (SALES *et al.*, 2010). Esses solos são caracterizados por apresentar composição granulométrica nas classes texturais de areia e areia franca ou franco-arenosa em profundidade de até 0,75 m. Um exemplo dessa expansão é a fronteira agrícola conhecida como MATOPIBA, que abrange áreas dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (DONAGEMMA *et al.*, 2016). Essa fronteira agrícola perfaz cerca de 75 milhões de hectares (SANTOS *et al.*, 2021), dos quais 20% são representados por solos leves, com destaque para os Neossolos Quartzarênicos e, também, para os Latossolos e Argissolos (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

Solos leves são estruturalmente frágeis e suscetíveis à compactação (GALARZA *et al.*, 2023) e à perda da capacidade produtiva (DONAGEMMA *et al.*, 2016). A compactação é a principal causa de degradação e de perda da qualidade física de solos agrícolas (BARBOSA *et al.*, 2021; REINERT *et al.*, 2008). Seus efeitos negativos se refletem em restrições nos fluxos de água e ar no perfil do solo, e incremento do impedimento mecânico ao crescimento de raízes (BARBOSA *et al.*, 2021; BATISTA *et al.*, 2019; IMHOFF *et al.*, 2001), afetando a capacidade de o solo manter funções ecológicas essenciais à saúde dos ecossistemas (STEFANOSKI *et al.*, 2013). Diante disso, o avanço da agropecuária sobre extensas áreas de solos leves no Brasil (DONAGEMMA *et al.*, 2016) suscitou questionamentos sobre a viabilidade e sustentabilidade de sua exploração agrícola (SALES *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2021).

Entre as práticas que compõem os sistemas de uso e manejo, o preparo é o que mais contribui para promover alterações nas propriedades físicas do solo, por atuar diretamente em sua estrutura (STEFANOSKI *et al.*, 2013). O preparo convencional, por exemplo, promove a desagregação (ALMEIDA *et al.*, 2016; REICHERT *et al.*, 2021), a perda de matéria orgânica e reduz a capacidade de suporte de cargas do solo, tornando-o mais suscetível à recompactação (BARBOSA *et al.*, 2021). A pulverização da estrutura (MORAES *et al.*, 2022) associada à manutenção do solo descoberto favorece a formação de uma camada superficial adensada, resultante do impacto direto das gotas de chuva sobre o solo, favorecendo o processo

de erosão (ALMEIDA *et al.*, 2016).

Os sistemas agrícolas modernos são caracterizados pelo uso intensivo do solo e de máquinas maiores e mais pesadas (BARBOSA *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2005). A principal consequência do tráfego excessivo de máquinas em áreas produtivas é a compactação do solo (BARBOSA *et al.*, 2021; REINERT *et al.*, 2008), cujos efeitos negativos são difíceis de serem contornados, sobretudo em sistemas altamente mecanizados (BARBOSA *et al.*, 2021), como os utilizados para a produção de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (CORDEIRO *et al.*, 2022), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (BARBOSA *et al.*, 2021; LUZ *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2005), milho (*Zea mays* L.) (PEREIRA *et al.*, 2010; SORATTO *et al.*, 2011; TAVANTI *et al.*, 2019) e soja (*Glycine max* (L.) Meer.) (CORDEIRO *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2021).

Em sistemas integrados com pastagens, por sua vez, além do tráfego de máquinas aliado ao não revolvimento do solo, o pisoteio animal também contribui para a compactação (TAVANTI *et al.*, 2019). Embora o sistema plantio direto e os sistemas de integração sejam recomendados como alternativas sustentáveis para mitigar os impactos da exploração agrícola de solos leves (BARBOSA *et al.*, 2022; DONA-GEMMA *et al.*, 2016; SALES *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2020), o intenso tráfego de máquinas e implementos, o pisoteio animal e o manejo inadequado (REINERT *et al.*, 2008) podem reduzir os benefícios associados à adoção desses sistemas (BARBOSA *et al.*, 2021).

A recuperação da qualidade física de solos arenosos compactados é difícil, mesmo com a adoção de práticas convencionais de preparo, devido à fraca resiliência desses solos (LUZ *et al.*, 2022). Além disso, esse processo de recuperação é lento e a qualidade física do solo pode não se restabelecer totalmente (GALARZA *et al.*, 2023). Diante da vulnerabilidade dos solos leves à degradação e das características dos sistemas de produção neles estabelecidos, ganha importância, estudos que visam sintetizar informações sobre os possíveis impactos dos diferentes sistemas de uso e de manejo sobre atributos físico-hídricos desses solos, de modo que possam auxiliar os produtores na tomada de decisão em práticas de manejo conservacionistas.

Esta revisão sistemática tem como objetivo sintetizar informações relacionadas aos efeitos de sistemas de uso e de manejo sobre a densidade, porosidade e intervalo hídrico ótimo (IHO) de solos leves, com vistas à definição de sistemas de manejo sustentáveis.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho é uma revisão sistemática de caráter misto ou, mais especificamente, uma revisão mista sequencial explanatória (GALVÃO; RICARTE, 2019). Esta modalidade de revisão sistemática, segundo os autores, integra síntese de estudos quantitativos e qualitativos na tentativa de medir efeitos de intervenções e explicar diferenças em seus efeitos.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi feita uma busca avançada de artigos científicos nas bases de dados Scopus e Scielo. Essas bases foram escolhidas por serem amplamente consultadas por pesquisadores. A busca avançada foi realizada empregando-se termos e suas combinações por meio dos operadores booleanos OR (ou) e AND (e), no campo de buscas por título do artigo, resumo e palavras-chave. Os termos utilizados para busca foram os seguintes: [(“light soils” OR “solos leves” OR “sandy soils” OR “solos arenosos” OR “sandy loam soil” OR “solo franco arenoso” OR “Oxisol” OR “Latossolo” OR “Quartzipsamment” OR “ Neossolo Quartzarênico” OR “Hapludalf” OR “Argissolo”) AND (“management systems” OR “sistemas de manejo” OR “soil physical quality” OR “qualidade física do solo” OR “indicators of physical quality” OR “indicadores de qualidade física” OR “soil structure” OR “estrutura do solo” OR “soil degradation” OR “degradação do solo” OR “soil physics” OR “física do solo” OR “soil compaction” OR “compactação do solo” OR “soil bulk density” OR “densidade do solo” OR “soil porosity” OR “porosidade do solo” OR “least limiting water range” OR “intervalo hídrico ótimo” OR “*Saccharum officinarum*” OR “cana-de-açúcar” OR “no-tillage” OR “plantio direto” OR “machine traffic” OR “tráfego de máquinas” OR “conventional preparation” OR “preparo convencional” OR “integrated agricultural systems” OR “sistemas agrícolas integrados” OR “pasture grazing” OR “pastagem” OR “animal trampling” OR “pisoteio animal”)].

Realizou-se filtragem dos artigos restringindo-os ao período de publicação de 2000 a 2024, e a trabalhos de pesquisas experimentais desenvolvidas no território brasileiro. Os artigos foram selecionados por meio da leitura de título, resumo e de material e métodos. Selecionaram-se artigos cujos respectivos trabalhos de pesquisa foram conduzidos em solos de textura arenosa ou arenosa/média com teor de areia superior a 50%, considerados como solos leves, conforme Donagemma *et al.* (2016). Utilizando esse critério, foram selecionados artigos cuja abordagem envolve o preparo

convencional, o sistema plantio direto, sistemas de pastagens integradas e não integradas e a colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Definições e características de solos leves

Os solos leves ocupam cerca de 8% do território brasileiro e são caracterizados por apresentar composição granulométrica nas classes texturais de areia e areia franca ou franco-arenosa em profundidade que pode ser superior a 0,75 m. Os Neossolos Quartzarênicos representam a principal classe de solos leves no Brasil e se estendem por cerca de 49,6 milhões de hectares, o equivalente a 5,82% da área do país. No bioma Cerrado, eles ocupam cerca de 30 milhões de hectares (15%) e são expressivos no MATOPIBA, fronteira agrícola formada por áreas dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Outras classes de solos que podem apresentar espessos horizontes de textura leve são os Latossolos, Argissolos, Luvisolos, Neossolos Fúlvicos, Planossolos e Plintossolos, com destaque para as duas primeiras classes (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

Os solos leves apresentam baixo potencial agrícola devido às limitações de natureza físico-hídricas e químicas (MORAES *et al.*, 2022). De modo geral, esses solos se caracterizam por apresentar estrutura frágil, baixa estabilidade de agregados e coesão entre partículas, elevada friabilidade, suscetibilidade à erosão e compactação, alta permeabilidade e baixa capacidade de retenção de água (CARNEIRO *et al.*, 2020; DONAGEMMA *et al.*, 2016; SENA *et al.*, 2021). Em relação às propriedades químicas, os solos leves apresentam baixa capacidade de troca catiônica (CTC), baixo teor de matéria orgânica, limitada disponibilidade de N, P e S e alta suscetibilidade à perda de nutrientes por lixiviação (MORAES *et al.*, 2022), especialmente N e K (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

Não obstante às características marginais à exploração agrícola, os solos leves são profundos, apresentam alta permeabilidade (SALES *et al.*, 2010), reduzida capacidade de adsorção de P e baixa acidez potencial (CARNEIRO *et al.*, 2020).

Entretanto, são menos resilientes e resistentes, sendo, portanto, mais sujeitos à degradação e à perda da capacidade produtiva quando comparados aos de textura fina sob condições semelhantes (DONAGEMMA *et al.*, 2016). Por isso, a exploração agrícola desses solos deveria ser evitada (SALES *et al.*, 2010). Entretanto, inovações nos sistemas de produção e nas técnicas de manejo permitiu a expansão da agropecuária sobre extensas áreas de solos leves, comumente sobre áreas de pastagens

degradadas (SILVA *et al.*, 2020), onde se destacam a produção de culturas economicamente importantes como algodão (CORDEIRO *et al.*, 2022), cana-de-açúcar (CARNEIRO *et al.*, 2020; LUZ *et al.*, 2022; MORAES *et al.*, 2022), eucalipto (*Eucalyptus* spp.) (SENA *et al.*, 2021), milho (PEREIRA *et al.*, 2010; SORATTO *et al.*, 2011; TAVANTI *et al.*, 2019) e soja (CORDEIRO *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2021;). Isso foi possível graças aos sistemas integrados de produção, como a integração lavoura-pecuária (ILP), integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e ao sistema plantio direto (SPD) (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

3.2 Sistemas de uso e de manejo e seus impactos sobre a qualidade física do solo

As propriedades físicas do solo controlam processos relacionados aos fluxos de calor, água e gases, fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Os teores de água no solo controlam as variações na temperatura, aeração e resistência à penetração de raízes que, por sua vez, são afetados pela densidade e porosidade. Portanto, as complexas interações entre os atributos do solo determinam as condições físicas adequadas às plantas, que podem ser entendidas como uma qualidade física do solo (COLLARES *et al.*, 2006). Por isso, Guimarães *et al.* (2013) e LUZ *et al.* (2022) sugerem que a avaliação dos impactos de sistemas de uso e de manejo deve ser realizada pela quantificação de atributos que controlam funções do solo determinantes do crescimento e desenvolvimento das plantas.

A qualidade física do solo, definida como a capacidade de o mesmo manter funções ecológicas essenciais à saúde dos ecossistemas (STEFANOSKI *et al.*, 2013), tem relação com sua estrutura (GUIMARÃES *et al.*, 2013). Solos sob vegetação nativa, sem qualquer interferência antrópica, apresentam propriedades físico-hídricas em condições adequadas ao crescimento das plantas (BLAINSKI *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2021; STEFANOSKI *et al.*, 2013). Entretanto, a introdução de sistemas agrícolas em substituição a vegetação nativa acarreta alterações na estrutura do solo, causando sua compactação (SANTOS *et al.*, 2021), que é a principal causa de degradação e de perda da qualidade física de solos agrícolas (BARBOSA *et al.*, 2021; IMHOFF *et al.*, 2001; REINERT *et al.*, 2008). Os efeitos negativos da compactação estão associados às restrições no fluxo de água e ar no perfil do solo, e incremento do impedimento mecânico ao crescimento de raízes (BARBOSA *et al.*, 2021; IMHOFF *et al.*, 2001).

Os sistemas agrícolas devem manter a capacidade do solo exercer suas funções físicas (BLAINSKI *et al.*, 2008). Entretanto, dependendo das condições edafoclimáticas, os diferentes sistemas de uso e de manejo tenderão a causar alterações nas propriedades do solo em taxas e direções que poderão comprometer sua qualidade física e capacidade produtiva (REICHERT *et al.*, 2009). Compactação, erosão e perda de matéria orgânica são fatores que levam à degradação do solo e, consequentemente, à perda de suas funções (BLAINSKI *et al.*, 2008).

Entre as práticas que compõem os sistemas agrícolas, o preparo é o que mais contribui para promover alterações nas propriedades físicas do solo, por atuar diretamente em sua estrutura (STEFANOSKI *et al.*, 2013). O preparo convencional (PC) caracterizado pelo revolvimento periódico com aração e gradagem promove a descompactação da camada mobilizada (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; REICHERT *et al.*, 2021), reduz a densidade e resistência mecânica à penetração (BARBOSA *et al.*, 2018), aumenta a macroporosidade e infiltração de água no solo (MORAES *et al.*, 2022). Entretanto, esses efeitos positivos são temporários (ALMEIDA *et al.*, 2016; LUZ *et al.*, 2022) devido ao processo de reconsolidação natural resultante dos ciclos de umedecimento e secagem, e das cargas aplicadas na superfície do solo, o qual tende a retornar à sua condição estrutural anterior à mobilização (BARBOSA *et al.*, 2018). Além disso, o acúmulo das pressões exercidas pelos órgãos ativos dos implementos ao longo dos anos de preparo tende a criar uma camada subsuperficial adensada (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004), conhecida comumente como “pé de arado” (MENTGES *et al.*, 2010).

O revolvimento periódico promove a desagregação, o que é indesejável, sobretudo em solos arenosos (REICHERT *et al.*, 2021), caracterizados por apresentar estrutura frágil, baixa estabilidade de agregados e baixos teores de matéria orgânica (BARBOSA *et al.*, 2018). A pulverização da estrutura (MORAES *et al.*, 2022) e manutenção do solo descoberto favorece a ocorrência de selamento superficial, fenômeno no qual a camada superficial de solo torna-se adensada pelo impacto direto das gotas de chuva, favorecendo o processo de erosão (ALMEIDA *et al.*, 2016). A intensidade desse fenômeno em solos arenosos é tanto maior quanto mais heterogênea for a distribuição de tamanho de partículas que compõe a fração areia (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

O PC leva à perda de matéria orgânica e reduz a capacidade de suporte de cargas do solo, tornando-o mais suscetível à recompactação pelo tráfego de máquinas

(BARBOSA *et al.*, 2021) ou pelo pisoteio animal (BATISTA *et al.*, 2019; LEÃO *et al.*, 2004; VALANI *et al.*, 2022). O revolvimento aumenta a macroporosidade, embora que temporariamente, resultando em maior taxa de infiltração de água e, consequentemente, em redução do conteúdo de água disponível (CAVALIERI *et al.*, 2006). Portanto, o mínimo revolvimento e a manutenção da cobertura do solo com resíduos culturais são práticas de manejo essenciais para preservar sua qualidade física (ALMEIDA *et al.*, 2016; CAVALIERI *et al.*, 2006; STEFANOSKI *et al.*, 2013) e resiliência (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

O sistema plantio direto (SPD) é uma prática de manejo conservacionista do solo que se baseia no mínimo revolvimento e na rotação de culturas, que contribui para a manutenção da superfície do solo protegida por uma camada de resíduos vegetais (SILVA *et al.*, 2014). O não revolvimento associado ao aporte de matéria orgânica na superfície (MENTGES *et al.*, 2010) reduz a amplitude térmica do solo, resultando em menor perda de água por evaporação (SILVA *et al.*, 2014). Além disso, a decomposição de raízes ao longo do perfil do solo cria um sistema de poros contínuos e funcionais (COLLARES *et al.*, 2006), importante para o fluxo de água e gases em profundidade (REINERT *et al.*, 2008). Portanto, de modo geral, o SPD contribui para a manutenção da qualidade física do solo (MENTGES *et al.*, 2010).

Entretanto, ao longo dos anos tem-se observado alterações na estrutura do solo em áreas sob SPD. Além do não revolvimento, que fica restrito à linha de semeadura e na camada superficial (MENTGES *et al.*, 2010), o intenso tráfego de máquinas, sobretudo em condições de elevada umidade do solo, tem ocasionado a compactação deste (COLLARES *et al.*, 2006; MENTGES *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2014). Além disso, a massa total das máquinas, o número de passadas durante o ciclo das culturas (SANTOS *et al.*, 2021) e a inadequada pressão de inflação dos pneus (MENTGES *et al.*, 2010) concorrem para a intensificação desse processo.

A escarificação e a subsolagem são práticas que podem ser implementadas para romper camadas compactadas em SPD (REINERT *et al.*, 2008). Essas práticas mecânicas contribuem para reduzir a densidade, a resistência à penetração de raízes e aumentar a macroporosidade do solo, com consequências positivas nas taxas de infiltração de água e condutividade hidráulica do solo saturado (MENTGES *et al.*, 2010).

Os sistemas integrados de produção oferecem uma diversidade de produtos agrícolas, pecuários e florestais (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Esses sistemas

envolvem quatro modalidades: integração lavoura-pecuária (ILP), integração lavoura-floresta (ILF), integração pecuária-floresta (IPF) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (VALANI *et al.*, 2022). O ILPF integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais na mesma área. Esse sistema envolve todas as atividades que compõem as combinações que caracterizam o ILP, ILF e IPF (NASCIMENTO *et al.*, 2019). De modo geral, os sistemas de integração são mais sustentáveis do que os não integrados, pois os efeitos sinérgicos de seus componentes concorrem para a melhoria da qualidade do solo e do meio ambiente (VALANI *et al.*, 2022).

As modalidades de integração mais comumente desenvolvidas são a ILP e a ILPF (DONAGEMMA *et al.*, 2016; NASCIMENTO *et al.*, 2019). Uma inovação desses sistemas foi a introdução do SPD, no qual as culturas agrícolas são semeadas diretamente sobre a palhada das gramíneas forrageiras. Uma desvantagem da semeadura direta nesses sistemas é a compactação do solo provocada pelo tráfego de máquinas durante o ciclo das culturas anuais que se soma ao pisoteio animal no período de entressafra (TAVANTI *et al.*, 2019). Entretanto, o somatório das interações ecológicas advindas do SPD, da rotação de culturas, e do componente pastagem, pode resultar em um sistema mais resiliente no longo prazo (NASCIMENTO *et al.*, 2019; VALANI *et al.*, 2022).

O pisoteio animal é a principal causa de degradação da estrutura de solos sob pastagens (BATISTA *et al.*, 2019). O pisoteio excessivo impõe cargas suficientes para causar compactação (LEÃO *et al.*, 2004), sobretudo quando o pastejo ocorre em condições de elevada umidade do solo e baixa massa de resíduos de forragem (FIDALSKI *et al.*, 2008). A pressão aplicada ao solo pelos animais em pastejo depende da massa corporal, da área do casco e da energia cinética (COSTA *et al.*, 2012). De acordo com Batista *et al.* (2024), uma vaca adulta em movimento aplica ao solo uma pressão que é de duas a quatro vezes maior do que a pressão aplicada quando a mesma está parada. Quando a carga aplicada na superfície excede a capacidade de suporte de cargas do solo, este sofre deformação irreversível de sua estrutura, resultando na ocupação do espaço poroso por partículas de solo. Consequentemente, a densidade aumenta e a porosidade total diminui, resultando em compactação (BATISTA *et al.*, 2019).

Os efeitos do pisoteio animal são mais acentuados na superfície, sobretudo até a profundidade de 0,15 m, onde se verificam maiores incrementos na densidade e redução da porosidade (FIDALSKI *et al.*, 2008). O aumento da taxa de lotação e da

pressão de pastejo são as principais causas da degradação física do solo (COSTA *et al.*, 2012), independentemente do sistema de produção, se contínuo, rotacionado ou integrado. Por isso, o ajuste da taxa de lotação em função da oferta de forragem é fundamental para amenizar os efeitos do pisoteio sobre os atributos físicos do solo (FIDALSKI *et al.*, 2008).

O manejo do pastejo respeitando-se um período de descanso e a manutenção de adequada massa de forragem cobrindo o solo, são estratégias fundamentais para a sustentabilidade do sistema de produção (SARMENTO *et al.*, 2008). O aporte de matéria orgânica animal e vegetal na superfície, a renovação radicular (COSTA *et al.*, 2012) e o crescimento de raízes das forrageiras em profundidade contribui para a recuperação da estrutura do solo alterada pelas cargas impostas pelo pisoteio (SARMENTO *et al.*, 2008).

A introdução da colheita mecanizada de cana-de-açúcar em substituição ao sistema de colheita manual tornou-se uma alternativa para mitigar os impactos ambientais gerados pela queima de canaviais (CAVALIERI *et al.*, 2011; LUCA *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2005). As colhedoras de cana-de-açúcar lançam na superfície do solo cerca de 10 a 20 Mg ha⁻¹ de folhas, bainhas, ponteiros e pedaços de colmo triturados, que contribui para a proteção física do solo e incremento da matéria orgânica (SOUZA *et al.*, 2005). Apesar desses benefícios, o tráfego de colhedora de elevada massa por eixo e de transbordo de cargas tracionado por tratores, ocasiona a compactação do solo em canaviais (BARBOSA *et al.*, 2018; CAVALIERI *et al.*, 2011; LUZ *et al.*, 2022).

Embora a adoção de plantio direto resulte em melhorias na estrutura do solo, o intenso tráfego de máquinas resulta em compactação. Diante disso, surge como alternativa a criação de faixas livres de tráfego, com a finalidade de aumentar a proporção de área sem compactação adicional. Essa estratégia baseia-se na criação de áreas destinadas para a passagem dos rodados e esteiras das máquinas, e de faixas não trafegadas ao redor das linhas de plantas. Isso é possível com o aumento da bitola das máquinas, uso do piloto automático, ajuste do espaçamento entrelinhas de cana-de-açúcar e uso de colhedoras multilinhas, estratégias que já vem sendo empregadas no Brasil (BARBOSA *et al.*, 2021).

3.3 Indicadores de qualidade física do solo

Os estudos que visam avaliar os impactos de sistemas de uso e manejo do solo deveriam ser realizados submetendo-se áreas de vegetação nativa ao uso agrícola e ao monitoramento periódico das alterações por meio da quantificação de atributos físicos do solo (BLAINSKI *et al.*, 2008). Entretanto, vários autores têm realizado esses estudos submetendo-se áreas aos sistemas de manejo de interesse e comparando-os com áreas adjacentes de vegetação nativa (áreas não antropizadas representativas da condição natural do solo) (BARBOSA *et al.*, 2022; SALES *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2021; VALANI *et al.*, 2022), respeitando-se os fatores pedogenéticos e topográficos entre as áreas comparadas (BLAINSKI *et al.*, 2008). Os resultados obtidos são, então, comparados com valores limiares de degradação citados na literatura (NASCIMENTO *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021).

Os indicadores mais comumente usados para avaliar os efeitos dos sistemas de uso e de manejo sobre a qualidade física do solo são a densidade, porosidade (macro, micro e porosidade total), resistência mecânica à penetração de raízes (SANTOS *et al.*, 2021), entre outros. No entanto, dada às interrelações entre as propriedades físicas do solo, o uso isolado de um indicador pode levar a interpretações errôneas (CAVALIERI *et al.*, 2006). Por isso, vários autores sugerem o uso de indicadores que integrem vários atributos em um ou poucos parâmetros (ARAÚJO; TORMENA; CARNEIRO *et al.*, 2009; CAVALIERI *et al.*, 2006; GUIMARÃES *et al.*, 2013), como é o caso da curva de resistência do solo à penetração (CRS) (BLAINSKI *et al.*, 2008), curva de retenção de água no solo (CRA) (MACHADO *et al.*, 2008) e o intervalo hídrico ótimo (IHO) (GUIMARÃES *et al.*, 2013).

A densidade do solo relaciona massa por unidade de volume (HOLTHUSEN *et al.* 2018). Em solos compactados há um aumento nessa relação (STEFANOSKI *et al.*, 2013). Para cada classe textural há um valor de densidade a partir do qual o crescimento de raízes é comprometido pela excessiva resistência à penetração, chamado de densidade do solo crítica (REINERT *et al.*, 2008). De modo geral, solos arenosos podem apresentar densidade variando entre 1,40 a 1,90 Mg m⁻³ (DONAGEMMA *et al.*, 2016). Entretanto, nesses solos, valores de densidade superiores a 1,75 Mg m⁻³ são citados por vários autores como sendo restritivos ao crescimento de raízes de plantas (SALES *et al.*, 2010; REICHERT *et al.*, 2009; REINERT *et al.*, 2008).

A porosidade representa a proporção de espaços vazios do solo que podem ser preenchidos com ar e solução (água e nutrientes). Os microporos têm função associada à retenção de água no solo e os macroporos à aeração e drenagem (RIBEIRO

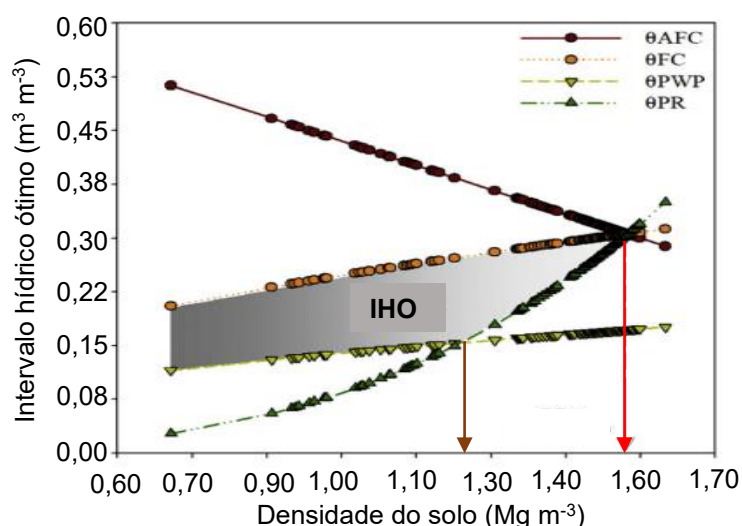
et al. 2007). A macroporosidade é influenciada pela densidade, conteúdo de água (STEFANOSKI *et al.*, 2013) e textura do solo (SALES *et al.*, 2010). A microporosidade, por sua vez, é influenciada pela textura, teor de matéria orgânica e muito pouco pelo aumento da densidade (SILVA *et al.*, 2008). Solos com valores de capacidade de armazenamento de água maior que 66% e capacidade de aeração inferior a 34%, podem apresentar condições restritivas às raízes das plantas pela deficiência de aeração. O mesmo acontece quando a macroporosidade é inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (SANTOS *et al.*, 2021).

A resistência à penetração representa o impedimento mecânico que o solo oferece ao crescimento das raízes (SILVA *et al.*, 2008). É uma propriedade influenciada pela textura (COSTA *et al.*, 2013) que se correlaciona positivamente com a densidade e negativamente com a umidade (BLAINSKI *et al.*, 2008; IMHOFF *et al.*, 2001; REICHERT *et al.*, 2009). Valores de resistência à penetração entre 1,0 e 4,5 MPa em solos com elevados teores de areia indicam condições de compactação (SANTOS *et al.*, 2021). Apesar de vários autores considerarem diferentes valores críticos como 2,5 MPa (LUZ *et al.*, 2022; NASCIMENTO *et al.*, 2019;), 3,0 MPa (CAVALIERI *et al.*, 2011; LEÃO *et al.*, 2004) e 4,45 MPa (TAVANTI *et al.*, 2019), em função de peculiaridades das culturas e dos sistemas de produção, valores de resistência à penetração a partir de 2,0 MPa são considerados por vários autores como sendo restritivos ao crescimento das raízes (ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004; BATISTA *et al.*, 2019; BLAINSKI *et al.*, 2008; COLLARES *et al.*, 2006; GUIMARÃES *et al.*, 2013; IMHOFF *et al.*, 2001; REICHERT *et al.*, 2009).

A CRS e a CRA são estimadas por funções de pedotransferência (SILVA *et al.*, 2008). A primeira estabelece a relação funcional entre resistência do solo à penetração, densidade e umidade do solo (BLAINSKI *et al.*, 2008). Já a segunda representa os conteúdos de água do solo em função de potenciais matriciais (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; MACHADO *et al.*, 2008). Por meio da CRS é possível estimar tanto a umidade quanto o valor de densidade do solo em que a resistência à penetração se torna crítica ao crescimento das raízes (BLAINSKI *et al.*, 2008). Já a CRA permite estimar o conteúdo de água nos potenciais equivalentes à capacidade de campo ($\Psi_{CC} = -0,01 \text{ MPa}$) e ponto de murcha permanente ($\Psi_{PMP} = -1,50 \text{ MPa}$) e, assim, determinar a água disponível (GUIMARÃES *et al.*, 2013), por exemplo. Além disso, tanto a CRS quanto a CRA são utilizadas para a determinação do IHO (LEÃO *et al.*, 2004).

O IHO representa a faixa de teores de água no solo em que as limitações impostas às raízes pela porosidade de aeração e pela resistência do solo à penetração são mínimas ou teoricamente inexistentes (ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004; COLLARES *et al.*, 2006; LUZ *et al.*, 2022; TAVANTI *et al.*, 2019). A amplitude correspondente ao IHO pode ser definida no limite superior pelo menor conteúdo de água entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e o conteúdo de água em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por sua vez, o limite inferior pode ser determinado pelo maior conteúdo de água entre aquele equivalente ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e o conteúdo de água no solo em que a resistência à penetração de raízes é crítica (θ_{RP}) (Figura 1) (CAVALIERI *et al.*, 2006; GUIMARÃES *et al.*, 2013).

Figura 1 – Intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo¹



¹A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo. θ_{AFC} = conteúdo de água equivalente à porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}); θ_{FC} = conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}); θ_{PWP} = conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); θ_{PR} = conteúdo de água correspondente à resistência à penetração crítica (θ_{RP}). A seta marrom indica o valor de densidade do solo de alerta (D_{sa}) e a seta vermelha indica o valor de densidade do solo crítica (D_{sc}). **Fonte:** Adaptado de Tavanti *et al.*, (2019).

O IHO é calculado pela diferença entre o limite superior e o limite inferior, havendo quatro possibilidades, conforme demonstrado matematicamente por Guimarães *et al.* (2013) e Leão *et al.* (2004), ou seja:

Se ($\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$) e ($\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$): $IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$;

Se ($\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$) e ($\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$): $IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$;

Se ($\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$) e ($\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$): $IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$;

Se ($\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$) e ($\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$): $IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$.

O IHO representa um aperfeiçoamento do tradicional conceito de água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) (CAVALIERI *et al.*, 2006; TAVANTI *et al.*, 2019) por integrar em uma mesma medida funções do solo associadas à aeração, umidade e resistência do solo à penetração (BATISTA *et al.*, 2019; CAVALIERI *et al.*, 2006; GUIMARÃES *et al.*, 2013; INMHOF *et al.*, 2001; LEÃO *et al.*, 2006), representando-as em função da densidade (GUIMARÃES *et al.*, 2013;). Em solos com estrutura preservada o IHO é numericamente igual à AD. Já em solos degradados, a amplitude de água menos limitante sofre restrições pela reduzida porosidade de aeração e/ou pela excessiva resistência mecânica do solo à penetração. Na primeira condição, para manter a porosidade de aeração em níveis não restritivos é necessário um conteúdo de água no solo inferior a θ_{CC} ; na segunda, para manter a resistência do solo à penetração em valores não restritivos ao crescimento de raízes é necessário um teor de água no solo superior a θ_{PMP} . Considerando as duas condições, simultaneamente, os limites superior e inferior do IHO são determinados pela θ_{PA} e pela θ_{RP} , respectivamente, caracterizando uma condição de solo degradado (CAVALIERI *et al.*, 2006).

O valor de densidade do solo a partir do qual o IHO passa a ser menor do que a AD é denominado de densidade do solo de alerta (D_{sa}) (Figura 1) (GUIMARÃES *et al.*, 2013). Já o valor de densidade em que o limite superior do IHO é igual ao limite inferior, ou seja, em que o IHO igual a zero, é denominado de densidade do solo crítica (D_{sc}) (IMHOFF *et al.*, 2001). Valores de densidade do solo superiores a D_{sc} indicam severa degradação estrutural do solo. Quanto maior a frequência de valores de densidade superiores a D_{sc} , maior a severidade das restrições impostas às raízes das plantas pela reduzida aeração e pela excessiva resistência mecânica à penetração de raízes (CAVALIERI *et al.*, 2006).

3.4 Densidade de solos leves sob sistemas de uso e de manejo

O preparo convencional do solo (PC) promove a descompactação da camada mobilizada (REICHERT *et al.*, 2021), reduz a D_s e a resistência à penetração de raízes (RP) (BARBOSA *et al.*, 2018), aumenta a macroporosidade e infiltração de água no solo (MORAES *et al.*, 2022). Entretanto, esses efeitos positivos são temporários (ALMEIDA *et al.*, 2016; LUZ *et al.*, 2022). Ribeiro *et al.* (2016) trabalhando em um Planossolo Háplico eutrofico típico de textura franco-arenosa, não verificaram diferenças na D_s entre uma área sob PC e outra há oito anos sob sistema plantio direto (SPD). Em

solo de mesma classe textural, Barbosa *et al.* (2018) também não verificaram diferenças na Ds entre PC e SPD. Esses resultados se devem ao processo de reconsolidação do solo (REICHERT *et al.*, 2021). Após o revolvimento, os ciclos de umedecimento e secagem, e o tráfego de máquinas, associados à condição de solo desestruturado, concorrem para que o mesmo retorne ao estado de compactação anterior à mobilização (REICHERT *et al.*, 2009).

O acúmulo das pressões exercidas pelos órgãos ativos dos implementos ao longo dos anos de PC tende a promover a compactação subsuperficial (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004). Araújo *et al.* (2010), trabalhando em um Latossolo Amarelo distrófico de textura franco-arenosa, não verificaram diferenças na Ds entre áreas sob PC e mata nativa até a profundidade de 0,10 m. Por sua vez, na camada de 0,10 a 0,20 m, PC apresentou maior Ds ($1,55 \text{ Mg m}^{-3}$) do que a área de vegetação ($1,34 \text{ Mg m}^{-3}$). Reichert *et al.* (2021) obtiveram valor crítico de Ds na camada de 0,20 a 0,40 m ($1,76 \text{ Mg m}^{-3}$), provavelmente devido à presença de “pé de arado” (MENTGES *et al.*, 2010).

A intensidade e extensão das alterações sofridas pelo solo sob SPD são diferentes daquelas observadas no PC (COLLARES *et al.*, 2006; REICHERT *et al.*, 2009). Collares *et al.* (2006), trabalhando em um Argissolo Vermelho distrófico arênico de textura franco-arenosa com histórico de 12 anos sob SPD, constataram maior valor de Ds ($1,76 \text{ Mg m}^{-3}$) na profundidade de 0,075 m. Nesta profundidade, Abreu, Reichert e Reinert (2004) verificaram maior resistência à penetração em solo franco-arenoso cultivado por 10 anos em SPD. Normalmente, nesse sistema o confinamento das cargas impostas pelo tráfego de máquinas é mais acentuado na superfície (MENTGES *et al.*, 2010), por isso, maior estado de compactação ocorre em profundidades próximas a 0,10 m (COLLARES *et al.*, 2006).

O esquema de culturas em SPD com soja no verão e milho segunda safra têm como fator crítico o fato de as operações de semeadura e colheita ocorrerem em condições de elevada umidade do solo, quando o mesmo apresenta baixa capacidade de suporte de cargas, o que favorece a compactação (TAVANTI *et al.*, 2019). A facilidade de deformação de solos de textura grosseira quando úmidos se deve ao efeito lubrificante da água que forma um filme ao redor das partículas favorecendo o seu deslizamento e rearranjo. Com o secamento ocorre aumento da capacidade de suporte de cargas desses solos devido à dificuldade de deformação dos grãos de areia. O aumento da Ds incrementa a coesão entre partículas e as forças de fricção,

reduzindo a movimentação delas e, conseqüentemente, a capacidade de deformação do solo (IMHOFF *et al.*, 2001). O incremento da matéria orgânica, por sua vez, pode diminuir esse efeito lubrificante, dada a sua elevada capacidade de retenção de água e, assim, aumentar a resistência do solo à compactação (MORAES *et al.*, 2022).

Uma das alternativas para romper camadas compactadas em SPD é a escarificação do solo (MENTGES *et al.*, 2010; REICHERT *et al.*, 2021; REINERT *et al.*, 2008). Entretanto, seus efeitos são temporários (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; REICHERT *et al.*, 2009). Diante disso, torna-se necessária a adoção de práticas complementares com vistas a incrementar o efeito residual da escarificação ou subsolação, como é o caso do uso de plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso (GUIMARÃES *et al.*, 2013), prática referida por Abreu, Reichert e Reinert (2004) como escarificação biológica.

Pereira *et al.* (2010) comparando culturas de cobertura em SPD no período pré-semeadura de milho num Latossolo Vermelho de textura arenosa/média, não constatarem valores de Dsc avaliada pelo intervalo hídrico ótimo em área manejada com crotalária (*Crotalaria juncea* L.) e lab-lab (*Dolichos lablab* L.). De acordo com Moraes *et al.* (2022), o crescimento e decomposição de raízes no perfil do solo, os exsudados radiculares, a atividade da microfauna e a manutenção da umidade do solo proporcionada pela adubação verde contribui para a agregação do solo e tem efeitos positivos sobre a Ds.

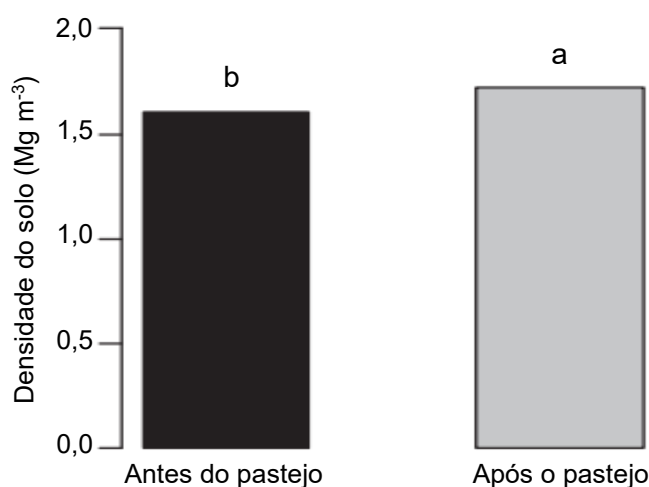
Silva *et al.* (2014), avaliando diferentes sistemas de manejo de um solo de textura arenosa/média (578 g Kg⁻¹ de areia na camada de 0,00 a 0,20 m) na entressafra de soja em SPD, constataram redução da Ds até a profundidade de 0,10 m, em manejo que consistiu do uso de *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R. D. Webster após colheita de soja, possivelmente devido ao sistema radicular da braquiária e à maior quantidade de palhada na superfície do solo proporcionada pela gramínea. Neste sentido, Moraes *et al.* (2022) ressaltam que a massa de resíduos vegetais amplia a área de contato entre os rodados das máquinas e o solo, dissipando a pressão aplicada. Esse “efeito amortecimento”, segundo os autores, reduz os efeitos do tráfego de máquinas sobre o estado de compactação do solo.

Em sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), o pisoteio animal pode aumentar a Ds (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Vários resultados de pesquisas conduzidas em solos leves sugerem que o comportamento da Ds em função do pisoteio animal não difere entre sistemas integrados e não

integrados de pastagens (CARNEIRO *et al.*, 2009; SALES *et al.*, 2010; VALANI *et al.*, 2022). Outros estudos, entretanto, sugerem que, provavelmente, a Ds não seja um indicador sensível, capaz de detectar melhorias na estrutura de solos leves em sistemas de pastagens integradas, tendo em vista a falta de significância estatística entre tratamentos envolvendo diferentes manejos de pastagem e/ou de pastejo nesses sistemas (BARBOSA *et al.*, 2022; FIDALSKI; TORMENA; ALVES, 2013; NASCIMENTO *et al.*, 2019; VALANI *et al.*, 2022).

Com o aumento da taxa de lotação, a Ds passa a ser mais influenciada pela pressão de pastejo do que pelo sistema de pastejo (FIDALSKI *et al.*, 2008). Batista *et al.* (2019) investigando os efeitos de pastejo contínuo de curta duração (21 dias) e de elevada taxa de lotação (12 UA ha⁻¹) sobre os atributos físicos de um Planossolo de textura franco-arenosa, constataram aumento da Ds na camada de 0,00 a 0,10 m de 1,60 Mg m⁻³ antes do pastejo para 1,72 Mg m⁻³ após o pastejo (Figura 2).

Figura 2 – Densidade de um Planossolo sob pastagem, antes e após pastejo contínuo de curta duração¹



¹Médias com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. **Fonte:** Adaptado de Batista *et al.* (2019).

Batista *et al.* (2024) trabalhando com pastagem de *Urochloa decumbens* Stapf. Prain., em um Argissolo-Vermelho distroférrico de textura franco-arenosa, sob manejo rotacionado com 7 dias de pastejo e 28 dias de descanso, e com taxa de lotação de 16 UA ha⁻¹ (1UA = 450 kg de peso vivo), constataram aumentos de 14 e 24% na Ds nas camadas de 0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, respectivamente, após o terceiro ciclo de pastejo, em relação à Ds média determinada antes do primeiro pastejo. Na camada de 0,00 a 0,10 m a Ds passou de 1,56 Mg m⁻³ para 1,76 Mg m⁻³, e de 1,48 para 1,64

Mg m⁻³ na camada de 0,10 a 0,20 m, ao final do primeiro e terceiro ciclo de pastejo, respectivamente. Leão *et al.* (2006), também obtiveram maiores valores de Ds em sistema rotacionado com taxa de lotação de 4,8 UA ha⁻¹, comparativamente a sistema de pastejo contínuo com taxa de lotação menor (1,53 UA ha⁻¹).

O ajuste da taxa de lotação em função da produção de forragem tem a vantagem de permitir a intensificação do sistema de produção sem comprometer a qualidade física do solo. Fidalski *et al.* (2008) investigaram o efeito de adubação nitrogenada sobre a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa. Os tratamentos consistiram de gramínea coastcross (*Cynodon dactylon* Pers.) consorciada com amendoim forrageiro (*Arachis pintoii* Krap. & Greg.), sem adubação nitrogenada, com 100 e com 200 kg ha⁻¹ de N aplicado anualmente, e coastcross solteiro com aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N. As pastagens foram ocupadas por novilhas cruzadas em sistema de pastejo contínuo e carga animal variável para manutenção de uma oferta de forragem de 6,6 kg para cada 100 kg de peso vivo animal. Os autores não constataram diferenças entre os tratamentos quanto à Ds, que variou de 1,63 Mg m⁻³ a 1,68 Mg m⁻³.

Sarmiento *et al.* (2008) também avaliaram os efeitos de adubação nitrogenada em pastagem de *Megathyrsus maximus* (Jacq.) Simon e Jacobs. (sin. *Panicum maximum* Jacq.), cultivar IPR-86 Milênio, em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura arenosa. As doses de N aplicadas foram 0, 150, 300 e 450 kg ha⁻¹. A pastagem foi manejada em sistema de lotação rotacionada com cinco dias de ocupação e 35 dias de descanso, pastejada por novilhos inteiros cruzados, considerando uma oferta de forragem de 11 kg para cada UA. Assim como observado por Fidalski *et al.* (2008), a Ds não diferiu entre tratamentos e variou de 1,26 Mg m⁻³ a 1,68 Mg m⁻³ na camada de 0,00 a 0,05 m, e de 1,60 a 1,63 Mg m⁻³ na camada de 0,05 a 0,10 m.

A colheita mecanizada de cana-de-açúcar ocasiona compactação de solo leves, principalmente pelo intenso tráfego de máquinas (SOUZA *et al.*, 2005; CAVALIERI *et al.*, 2011). Luca *et al.* (2008) constataram compactação até a profundidade de 0,20 m em um Argissolo Vermelho Amarelo de textura arenosa/média e em um Neossolo Quartzarênico cultivados com cana-de-açúcar e com colheita mecanizada. Cavalieri *et al.* (2011) obtiveram valores médios de Ds em um Latossolo Vermelho de textura arenosa/média e em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa, superiores a 1,70 Mg m⁻³ até a profundidade de 0,40m, após três ciclos de colheita.

Considerando a suscetibilidade à compactação de solos leves (GALARZA *et al.*, 2023), as elevadas cargas a que esses solos são expostos em monoculturas de cana (BARBOSA *et al.*, 2021), e o fato das operações de preparo do solo visando a descompactação ocorrerem a cada 5 ou mais anos, durante a reforma do canavial (MORAES *et al.*, 2022), o manejo adequado do solo durante o plantio ou replantio da cana (LUZ *et al.*, 2022) e o controle do tráfego de máquinas, especialmente de colheadoras (BARBOSA *et al.*, 2021), é fundamental para a conservação do solo. Luz *et al.* (2022) trabalhando em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa obtiveram menor valor médio de Ds ($1,67 \text{ Mg m}^{-3}$) em canavial submetido ao preparo mínimo (PM) no período de reforma e tráfego controlado de máquinas durante a colheita. Por sua vez, tratamentos que consistiram de PC e de PM durante o replantio do canavial e tráfego intensivo durante a colheita, apresentaram igual valor de Ds, $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, que foi estatisticamente superior ao verificado no tratamento com PM e tráfego controlado de máquinas.

Souza *et al.* (2005) verificaram efeito benéfico da incorporação de palhada de cana-de-açúcar com escarificação até a profundidade de 0,30 m, sobre a Ds de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura arenosa/média. Em todas as camadas avaliadas a Ds no sistema de colheita mecanizada com incorporação de palhada foi inferior à dos demais sistemas estudados (Tabela 1). Portanto, a incorporação de resíduos de cana-de-açúcar pode ser uma alternativa para mitigar os efeitos do tráfego de máquinas sobre o estado de compactação de solos leves. Entretanto, é importante ressaltar que os resultados obtidos pelos autores podem ter sido influenciados pelo curto período de tempo em que os sistemas de colheita e de manejo da palhada foram adotados, podendo não persistirem no longo prazo.

Tabela 1 – Densidade média de um Latossolo Vermelho-Amarelo em três profundidades e três sistemas de manejo da palhada de cana-de-açúcar¹

Sistema de colheita	Profundidade (m)		
	0,00 - 0,10	0,10 - 0,20	0,20 - 0,30
Densidade (Mg m^{-1})			
Cana queimada	1,50Bb	1,52Bb	1,58Aa
Cana crua com incorporação	1,40Cb	1,42Cb	1,50Ba
Cana crua sem incorporação	1,60Aa	1,58Aa	1,62Aa
CV (%)	4,75		

¹Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância. CV: coeficiente de variação (%). **Fonte:** Adaptado de Souza *et al.* (2005).

3.5 Porosidade de solos leves sob sistemas de uso e de manejo

Sistemas de uso e de manejo do solo promovem a redistribuição do tamanho de poros e alteram sua continuidade e conectividade (LUZ *et al.*, 2022). A redução de macroporos a microporos ocorre até que os valores de microporosidade (M_i) se aproximem dos valores de porosidade total (PT) (COLLARES *et al.*, 2006). Maior proporção de macroporos favorece a infiltração de água no solo e aeração (GALARZA *et al.*, 2023). Solos arenosos sob condições naturais (mata nativa, por exemplo), apresentam elevada macroporosidade (M_a) e baixa M_i e PT (SANTOS *et al.*, 2021; VALANI *et al.*, 2022).

A maioria dos estudos sugere um valor crítico de macroporos ou porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor abaixo do qual a oxigenação das raízes é comprometida (ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004; BATISTA *et al.*, 2019; COLLARES *et al.*, 2006; LUZ *et al.*, 2022; FIDALSKI *et al.*, 2008; IMHOFF *et al.*, 2001; REICHERT *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2021). No entanto, Nascimento *et al.* (2019) sugerem que esse valor deva ser de no mínimo $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solos com elevados teores de areia, como os franco-arenosos. Segundo Ribeiro *et al.* (2016) em solos arenosos a M_a é constituída principalmente por poros texturais provenientes dos espaços entre as partículas elementares que, por sua vez, são mal interconectados, e que podem ter reduzida contribuição com a aeração em profundidade.

A maior M_a observada em sistemas de preparo convencional se deve à persistência dos efeitos do revolvimento do solo, que promove a descompactação e formação de poros de aeração (SILVA *et al.*, 2008; TORMENA *et al.*, 2004). Trabalhando em um Argissolo Vermelho de textura arenosa, Silva *et al.* (2008) não verificaram diferenças na M_a avaliada na camada de 0,00 a 0,10 m, entre uma área preparada convencionalmente, que apresentou M_a de $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e outra sob vegetação nativa tomada como referência, cujo valor médio de M_a foi de $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Sob o mesmo sistema de preparo, Reichert *et al.* (2021) obtiveram valores de M_a de 0,24 e $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nas camadas de 0,00 a 0,05 e 0,05 a 0,10 m, respectivamente, em um solo franco-arenoso.

O aumento da M_a em consequência do revolvimento do solo, embora seja temporário, pode ter um efeito indesejável, sobretudo nos solos de textura arenosa e com baixos teores de matéria orgânica (CAVALIERI *et al.*, 2006). De acordo com Galarza *et al.* (2023), maior proporção de macroporos favorece a infiltração de água no solo o

que se reflete em diminuição nos valores de água disponível às plantas, pois os macroporos não contribuem para a retenção de água.

Os macroporos são a classe de poros mais sujeita a sofrer alterações em decorrência do manejo do solo (TORMENA *et al.*, 2004). Ribeiro *et al.* (2016) obtiveram valores limitantes de $Ma (< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$ em um solo de textura franco-arenosa preparado convencionalmente. Araújo *et al.* (2010), também constataram valores de porosidade de aeração limitantes em solo de mesma classe textural e sob o mesmo sistema de preparo. Esses resultados podem estar associados ao processo de empacotamento ao qual os solos arenosos estão sujeitos, sobretudo aqueles com heterogeneidade no tamanho de partículas. Nesta condição, as partículas menores tendem a ocupar os espaços entre as maiores, com a consequente redução do espaço poroso (DONAGEMMA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2021).

Investigando os impactos da conversão de áreas de vegetação nativa em sistemas agrícolas, Santos *et al.* (2021) estudaram três Latossolos de textura arenosa/média em três localidades da região do MATOPIBA, com histórico de 22 anos sob SPD. Os autores constataram redução da PT em todas as localidades, em relação às áreas de cerrado nativo tomadas como referência. Também observaram redução da Ma para valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em todas as camadas avaliadas. Por outro lado, os valores de Mi foram superiores aos constatados nas áreas de Cerrado. Esses resultados sugerem que a degradação física desses solos em decorrência do uso intensivo levou à compressão de parte dos macroporos, com o consequente aumento dos microporos (COLLARES *et al.*, 2006). O aumento da Mi nesses solos pode ter um efeito benéfico pelo aumento da retenção de água, confirmada pela correlação positiva com a capacidade de armazenamento de água no solo ($r = 0,61$) obtida pelos autores. Entretanto, Blainski *et al.* (2008) ressaltam que em condições de elevada umidade, a aeração do solo pode ser comprometida pela redução da Ma .

Solos com valores de capacidade de armazenamento de água maior que 66% e capacidade de aeração inferior a 34%, podem apresentar condições restritivas às raízes das plantas pela deficiência de aeração (SANTOS *et al.*, 2021). Entretanto, vários estudos utilizando o intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade física demonstra que em solos leves, mesmo sob diferentes sistemas de manejo e em diferentes condições climáticas, a porosidade de aeração frequentemente não atinge níveis restritivos (BATISTA *et al.*, 2019; IMHOFF *et al.*, 2001; LEÃO *et al.*, 2006; NASCIMENTO *et al.*, 2019; TAVANTI *et al.*, 2019).

Estudo conduzido em um Argissolo Amarelo distrocoeso de textura arenosa no município de Brejo, estado do Maranhão, Barbosa *et al.* (2022) constataram valores de PT em SPD com histórico de 14 anos, inferiores aos observados em área de vegetação nativa, até a profundidade de 0,30 m. Esse resultado se deve ao não revolvimento do solo, às pressões impostas pelo tráfego de máquinas (COLLARES *et al.*, 2006; MENTGES *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2021) e, provavelmente, ao manejo das culturas, que durante os 14 anos consistiu de sucessão soja/milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). De acordo com Reinert *et al.* (2008), em SPD a compactação é mais acentuada quando o manejo envolve sucessão de culturas. Por sua vez, a rotação com diferentes espécies na mesma área (SANTOS *et al.*, 2021) e o manejo de culturas de cobertura na entressafra (SILVA *et al.*, 2014), são práticas que melhoram a qualidade estrutural do solo.

A massa de resíduos vegetais em superfície e a matéria orgânica conferem “elasticidade” ao solo (REICHERT *et al.*, 2009), tornando-o menos sujeito a sofrer deformações irreversíveis, o que contribui para a preservação de seu espaço poroso (MORAES *et al.*, 2022). O crescimento e decomposição de raízes ao longo do perfil do solo também contribui para a formação de um sistema poroso funcional, contínuo e interconectado (LUZ *et al.*, 2022). Neste sentido, fatores críticos associados à cultura da soja em solos leves dizem respeito ao fato de o sistema radicular da leguminosa ser pouco profundo e, à menor produção de biomassa pela soja (2 a 4 Mg ha⁻¹), que é de rápida decomposição (C/N < 30) (MORAES *et al.*, 2022). Santos *et al.* (2021) também destacam a particularidade da cultura do algodoeiro, que exige várias práticas de manejo ao longo do ciclo, o que se reflete em aumento do tráfego de máquinas. Por sua vez, a cultura aporta pouca matéria orgânica, dada a baixa quantidade de resíduos deixados sobre o solo após a colheita, o que, segundo os autores, pode agravar a qualidade estrutural de solos leves.

A matéria orgânica pode interagir com a fração mineral do solo formando agregados de alta elasticidade, de tal modo que, após a aplicação de cargas na superfície, as partículas de solo retornam à condição inicial, sem afetar os espaços porosos. A elevada capacidade de retenção de água da matéria orgânica também pode promover o aprisionamento de bolhas de ar de difícil expulsão na presença de água. A aplicação de cargas na superfície do solo pelo tráfego de máquinas comprime essas bolhas que se expandem e deslocam o solo, o qual retorna à condição inicial após cessar as pressões. Portanto, o incremento da matéria orgânica tende a

aumentar a resiliência de solos leves ao tráfego de máquinas, reduzindo sua suscetibilidade natural à compactação (MORAES *et al.*, 2022).

Mentges *et al.* (2010) obtiveram valores críticos de porosidade de aeração ($< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) nas camadas de 0,00 a 0,10 ($0,072 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), 0,10 a 0,20 ($0,063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 0,20 a 0,30 ($0,093 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em solo franco-arenoso com 13 anos sob SPD. Em SPD de 12 anos, Collares *et al.* (2006) constataram maior M_a na camada superficial. Valores críticos foram observados abaixo de 0,05 m de profundidade, acompanhando os valores de D_s . Esses autores ressaltam que em SPD, mesmo o solo apresentando valores limitantes de M_a , o aporte de matéria orgânica e a decomposição de raízes contribui para o aumento da porosidade do solo pela formação de bioporos. Embora os bioporos, normalmente, representem menos de 3% do volume de solo, e apesar de não influenciarem significativamente a D_s , são importantes para o fluxo de gases e água no perfil do solo (REINERT *et al.* 2008).

Resultados obtidos por Barbosa *et al.* (2022) sugerem que o manejo de solos leves com rotação SPD exclusivamente, seguido de sistema de integração de curto prazo, pode melhorar a qualidade estrutural e elevar a porosidade do solo. Em sistemas ILP de 2 e 4 anos estabelecidos após SPD com pastagem de *Urochloa ruziziensis* R. Germ. e C. M. Evrard e com taxa de lotação de $0,8 \text{ UA ha}^{-1}$ na entressafra de milho, os autores obtiveram os maiores valores de PT , M_a e M_i , em relação a sistema ILP de 8 anos.

Valani *et al.* (2022) compararam os efeitos do pisoteio animal em sistemas de pastagens integradas (ILP, ILF e ILPF) e não integradas (pastejo contínuo e rotacionado) após 8 anos de estabelecidos num Latossolo Vermelho-Amarelo distrocoeso de textura arenosa/média. No sistema de pastagem não integrada sob pastejo contínuo, a taxa de lotação variou na estação chuvosa de $1,0$ a $1,5 \text{ UA ha}^{-1}$, e de $0,5$ a $0,8 \text{ UA ha}^{-1}$ na estação seca. Nos três sistemas de integração o pastejo foi semelhante ao do sistema rotacionado, com 6 dias de pastejo e 30 dias de descanso, e taxa de lotação variando de $2,0$ a $3,0 \text{ UA ha}^{-1}$ na estação chuvosa e $1,5 \text{ UA ha}^{-1}$ na estação seca. Os autores constataram redução de cerca de 26 % da PT em relação à vegetação nativa usada como referência (Tabela 2). Particularmente, em ILPF essa redução foi de aproximadamente 10 % em relação ao pastejo rotacionado. À exceção de pastejo contínuo, todos os demais sistemas apresentaram M_a inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A M_i não

diferiu entre tratamentos, cujos valores foram superiores ao obtido em vegetação nativa e numericamente próximos aos de PT observados nos respectivos sistemas, corroborando argumentos de Collares *et al.* (2006).

Tabela 2 – Médias mais erro padrão de porosidade total (PT), Macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas integrados de pastagens e não integrados¹

Sistemas	PT	Ma	Mi
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$		
CONT	$0,4420 \pm 0,0040\text{cd}$	$0,1031 \pm 0,0110\text{b}$	$0,3389 \pm 0,0148\text{ab}$
ROT	$0,4594 \pm 0,0223\text{b}$	$0,0833 \pm 0,0187\text{bce}$	$0,3761 \pm 0,0094\text{a}$
ILP	$0,4483 \pm 0,0072\text{c}$	$0,0773 \pm 0,0046\text{bce}$	$0,3710 \pm 0,0039\text{a}$
ILF	$0,4475 \pm 0,0076\text{c}$	$0,0953 \pm 0,0130\text{b}$	$0,3522 \pm 0,0125\text{ab}$
ILPF	$0,4150 \pm 0,0076\text{d}$	$0,0538 \pm 0,0082\text{c}$	$0,3612 \pm 0,0123\text{a}$
VN	$0,5591 \pm 0,232\text{a}$	$0,2753 \pm 0,0391\text{a}$	$0,2838 \pm 0,0178\text{b}$

¹Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem pelo teste de Kruskal-Wallis a 5 % de probabilidade. CONT = pastejo contínuo; ROT = pastejo rotacionado; ILP = integração lavoura-pecuária; ILF: integração lavoura-floresta; ILPF = integração lavoura-pecuária- floresta; VN = vegetação nativa. **Fonte:** Adaptado de Valani *et al.* (2022).

Considerando o potencial dos sistemas de integração manterem a qualidade física do solo (BARBOSA *et al.*, 2022; TAVANTI *et al.*, 2019) em função dos efeitos sinérgicos de seus componentes (VALANI *et al.* 2022), os resultados obtidos por estes autores foram adversos à proposta de sustentabilidade. Diante disso, deve-se considerar algumas práticas como a rotação de culturas (REINERT *et al.*, 2008), o ajuste da taxa de lotação com base em recomendações para sistemas integrados (TAVANTI *et al.*, 2019) e o desbaste de árvores no ILPF para amenizar o possível “efeito sombreamento” (NASCIMENTO *et al.*, 2021). De acordo com estes autores, em sistemas com o componente florestal, os animais tendem a se concentrar nas áreas sombreadas, levando à concentração espacial do pisoteio nessas áreas e contribuindo para a redução da massa de resíduos protegendo o solo, acentuando o processo de compactação.

A adoção de preparo mínimo por ocasião da reforma de canavial e do tráfego controlado de máquinas, especialmente durante a colheita mecanizada, pode preservar a porosidade de solo arenoso durante o ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Luz *et al.* (2022) obtiveram maior PT e Ma em tratamento que consistiu de preparo reduzido do solo e tráfego controlado de máquinas na colheita (PR + TC), por meio da simulação de faixas livres de tráfego (Tabela 3). Menor PT e Ma foram obtidos nos tratamentos com preparo convencional e tráfego aleatório de máquinas na colheita (PC + TA)

e preparo reduzido também com tráfego aleatório (PR + TA). A menor Mi observada em PR + TC sugere que a proporção de macroporos não foi alterada pela redistribuição do tamanho de poros, provavelmente devido ao menor tráfego de máquinas nesse tratamento.

Tabela 3 – Porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) na camada de 0,00 a 0,10 m de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de preparo do solo na reforma de canavial e manejo de tráfego de máquinas¹

Tratamentos	PT	MA	MI
	m ³ m ⁻³		
PC + TA	0,33b	0,11b	0,22b
PR + TA	0,33b	0,10b	0,23a
PR + TC	0,37a	0,18a	0,19c

¹Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PC + TA: preparo convencional com tráfego aleatório; PR + TA: preparo reduzido com tráfego aleatório; PR + TC: preparo reduzido com tráfego controlado. **Fonte:** Adaptado de Luz *et al.* (2022).

Resultados obtidos por Moraes *et al.* (2022) sugerem que o uso de plantas de cobertura no período de reforma de canavial tende a manter a qualidade estrutural de solos arenosos. Trabalhando com diferentes sistemas de manejo de um Argissolo Vermelho distrófico no período de reforma de canavial, esses autores obtiveram maiores valores de PT, Ma e Mi, após o terceiro ciclo de colheita mecanizada, em tratamento que consistiu de plantio de cana-de-açúcar em área anteriormente revolvida e mantida sob cultivo de crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.). Por sua vez, manejos com preparo convencional seguido de plantio de cana e preparo convencional seguido de soja apresentaram os piores resultados.

Souza *et al.* (2005) avaliando sistemas de colheita e manejo de palhada de cana-de-açúcar em solo de textura arenosa/média constataram maior PT e Ma em colheita mecanizada com incorporação de 70 % dos resíduos por meio de escarificação (Tabela 4). A PT não diferiu entre os sistemas de colheita manual com queima prévia e colheita mecanizada sem incorporação, que foram estatisticamente inferiores ao sistema de colheita mecanizada com incorporação, até a profundidade de 0,20 m. O tráfego de máquinas e a não incorporação da palhada, provavelmente contribuiu para que o tratamento sob colheita mecanizada apresentasse valores restritivos de porosidade de aeração (< 0,10 m³ m⁻³). Quanto à Mi, o sistema de colheita mecanizada com incorporação apresentou menores valores de microporos, provavelmente devido ao revolvimento do solo.

Tabela 4 – Porosidade total, macroporosidade e microporosidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo em três profundidades e três sistemas de manejo da palhada de cana-de-açúcar¹

Sistema de colheita	Profundidade (m)		
	0,00 - 0,10	0,10 - 0,20	0,20 - 0,30
Porosidade total (m ³ m ⁻³)			
Manual com queima prévia	0,42 Ba	0,40Ba	0,39Aa
Mecanizada com incorporação	0,49Aa	0,47Aab	0,45Ab
Mecanizada sem incorporação	0,40Ba	0,38Bab	0,36Ab
CV (%)	6,45		
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)			
Manual com queima prévia	0,15Ba	0,17Aa	0,11Ab
Mecanizada com incorporação	0,20Aa	0,19Aa	0,10Ab
Mecanizada sem incorporação	0,08Ca	0,08Ba	0,06Ba
CV (%)	9,78		
Microporosidade (m ³ m ⁻³)			
Manual com queima prévia	0,32Bb	0,36Ba	0,37Ba
Mecanizada com incorporação	0,27Ca	0,27Ca	0,32Ca
Mecanizada sem incorporação	0,37Ab	0,41Aa	0,44Aa
CV (%)	8,24		

¹Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, para a mesma variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância. CV: coeficiente de variação (%). **Fonte:** Adaptado de Souza *et al.* (2005).

3.6 Intervalo hídrico ótimo de solos leves sob sistemas de uso e de manejo

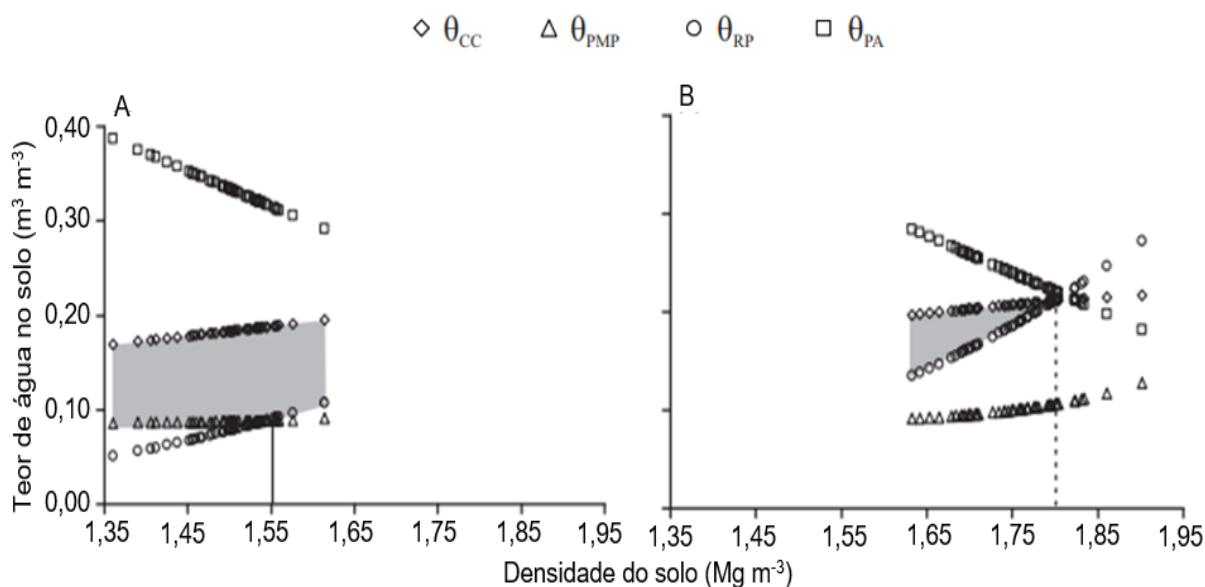
Naturalmente, solos arenosos apresentam estreita amplitude de IHO o que está associado à baixa capacidade de retenção de água desses solos. Porém, essa faixa pode ser ainda mais estreita devido à compactação pelo pisoteio animal (BATISTA *et al.*, 2019), pelo tráfego de máquinas e pelo manejo inadequado (REINERT *et al.*, 2008). Por sua vez, o incremento nos teores de carbono orgânico nesses solos é fundamental para aumentar a resistência do solo à deformação e a capacidade de retenção de água (GALARZA *et al.*, 2023).

Resultados obtidos por vários autores demonstram que a resistência à penetração (RP) é, frequentemente, o limite crítico inferior do intervalo hídrico ótimo (IHO) em solos leves e, portanto, é a principal propriedade responsável pela redução da amplitude de água menos limitante desses solos, comparativamente à porosidade de aeração (BATISTA *et al.*, 2019; COLLARES *et al.*, 2006; IMHOFF *et al.*, 2001; NASCIMENTO *et al.*, 2019; TAVANTI *et al.* 2019). O aumento da Ds afeta o espaço poroso do solo e a distribuição de tamanho de poros pela redução de macroporos a microporos, com o consequente aumento da coesão e fricção entre partículas, resultando em incrementos na RP. Com isso, para manutenção da RP em valores não restritivos às

plantas, torna-se necessário maiores teores de água no solo. Solos compactados respondem com maiores incrementos na RP quando submetidos ao secamento, comparativamente a solo com estrutura preservada sob taxas semelhantes de perda de umidade. Portanto, solos não compactados toleram maior secamento sem que a RP atinja valores críticos ao crescimento de raízes (BLAINSKI *et al.*, 2008).

Utilizando o IHO como indicador de qualidade física de solo, Guimarães *et al.* (2013) constataram perda da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho distrófico de textura franco-arenosa sob PC, em relação à área sob vegetação nativa. A amplitude do IHO no PC foi severamente afetada pela RP, diferentemente do observado em mata nativa (Figura 3). Os teores de água (θ) necessários para manutenção da RP em níveis não restritivos ao crescimento de raízes (θ_{RP}) foi maior do que o conteúdo de água equivalente ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em toda a faixa de Ds obtida em PC. No valor de Ds de $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ a θ_{RP} foi igual ao conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), implicando em IHO igual a zero.

Figura 3 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) na camada de 0,00 a 0,10 m de um Latossolo Vermelho distrófico sob vegetação nativa (A) e preparo convencional (B)¹



¹A área hachurada representa o IHO; θ_{CC} : teor de água na capacidade de campo; θ_{PMP} : teor de água no ponto de murcha permanente; θ_{RP} : conteúdo de água equivalente à resistência do solo crítica de 2,0 MPa; e θ_{PA} : conteúdo de água equivalente à porosidade de aeração crítica de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na figura 1A, a linha contínua indica a densidade do solo de alerta (D_{sa}); Na figura 1B a linha tracejada indica o valor de densidade do solo crítica. **Fonte:** Adaptado de Guimarães *et al.* (2013).

Cavalieri *et al.* (2006), entretanto, constataram efeito positivo do revolvimento do solo sobre o IHO até a profundidade de 0,15 m em um Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa/média. Os autores obtiveram maior IHO em PC e preparo mínimo (PM), que não diferiram estatisticamente entre si, com valores médios de 0,068 e 0,055 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente, em relação a preparo sem revolvimento (PSR) (0,019 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Entretanto, em todos os sistemas avaliados o IHO tendeu a zero em valores de D_s de 1,65, 1,66 e 1,68 Mg m^{-3} em PSR, PM e PC, respectivamente, influenciado principalmente pela RP. Portanto, mesmo com variações, todos os sistemas de preparo concorreram para a degradação da qualidade física do solo.

Os efeitos positivos do PC são temporários (ALMEIDA *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2018) e, além disso, promove a desestruturação, a perda de matéria orgânica e reduz a capacidade de suporte de cargas do solo, tornando-o mais suscetível à recompactação (BARBOSA *et al.*, 2021). Diante disso, e considerando os resultados obtidos por Guimarães *et al.* (2013) e Cavalieri *et al.* (2006) estudando solos de texturas similares, pode-se preconizar a adoção de preparo mínimo em solos leves como alternativa viável em substituição ao preparo convencional. Neste sentido, Guimarães *et al.* (2013) ressaltam a necessidade de complementar o emprego de escarificação e subsolagem com a semeadura de plantas de cobertura com sistema radicular profundo e agressivo, como forma de incrementar o efeito residual das práticas mecânicas.

Collares *et al.* (2006) trabalhando em um Argissolo de textura franco-arenosa com três experimentos envolvendo SPD consolidado, obtiveram maiores valores de IHO nos primeiros 0,05 m de profundidade. Em cada experimento, os maiores valores médios obtidos foram 0,09, 0,12 e 0,13 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, nos valores de D_s de 1,53, 1,43 e 1,38 Mg m^{-3} , respectivamente. Esses resultados se devem ao menor estado de compactação observado na camada superficial em SPD, provavelmente devido a maior densidade de raízes na superfície, aos maiores teores de matéria orgânica, aos ciclos de umedecimento e secagem, e a mobilização do solo por ocasião da semeadura (REINERT *et al.*, 2008).

Considerando a faixa ótima citada por Nascimento *et al.* (2019) para o IHO ($0,15 \leq \text{IHO} \leq 0,20 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$), os valores médios obtidos por Collares *et al.* (2006) são baixos, o que aumenta o risco de exposição das culturas a condições de déficit hídrico. Entretanto, em SPD, o crescimento (LUZ *et al.*, 2022) e a decomposição de raízes no perfil do solo cria um sistema de poros contínuos e funcionais (REINERT *et al.*, 2006)

que funciona como rota alternativa através da qual as raízes podem crescer, mesmo em camadas com elevado impedimento mecânico (BLAINSKI *et al.*, 2008), como no caso das camadas abaixo de 0,05 m em que Collares *et al.* (2006) constataram maior influência da RP na redução do IHO.

Em SPD, além do controle do tráfego de máquinas (SALES *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2021), o manejo adequado do solo na entressafra contribui para reduzir os impactos da compactação. Silva *et al.* (2014) trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa/média constataram que o plantio de braquiária brizanta na entressafra de soja aumentou a amplitude do IHO em aproximadamente 25 % em relação aos manejos com milho consorciado com braquiária ruziziensis, grãos em segunda safra seguido de pousio, pousio após safra de verão e mata nativa, devido à redução da resistência à penetração proporcionada pela braquiária.

Tavanti *et al.* (2019) avaliando a variabilidade espacial de atributos físicos do solo por meio de técnicas de geoestatística em sistemas ILP com elevada taxa de lotação (6 UA ha⁻¹ no período chuvoso e 2 UA ha⁻¹ no período seco) em solo de textura arenosa/média, constataram valores de θ_{RP} acima de 0,27 m³ m⁻³. Considerando que a θ_{CC} apresentou variação espacial de 0,28 a 0,31 m³ m⁻³, a proximidade entre θ_{RP} e θ_{CC} é indicativo de severa degradação da estrutura do solo pelo pisoteio animal. Isso significa que a umidade necessária para manutenção da resistência à penetração em níveis não limitantes às plantas, que no referido estudo foi de 4,45 Mpa, é próxima da θ_{CC} , o que eleva o risco de exposição das culturas a condições estressantes de déficit hídrico (IMHOFF *et al.*, 2001).

Resultados obtidos por Batista *et al.* (2019) sugerem que a intensidade de pastejo afeta o IHO de solos arenosos, mesmo diante de curto período de pastejo. Esses autores desenvolveram estudo em um Planossolo de textura franco-arenosa no município de Capoeiras, estado de Pernambuco. A pastagem de braquiária decumbens foi pastejada continuamente durante 21 dias por novilhas de raça Girolando, com taxa de lotação de 12 UA ha⁻¹. Após esse período foi constatada redução do IHO até a profundidade de 0,10 m, de um valor médio de 0,068 m³ m⁻³ antes do pastejo, para 0,046 m³ m⁻³ após o pastejo.

Leão *et al.* (2004) trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa/média, constataram melhor condição físico-hídrica expressa pelo IHO em pastagem de braquiária decumbens sob pastejo contínuo com taxa de lotação média de 1,50 UA ha⁻¹ e manutenção de massa de forragem de 3,0 Mg ha⁻¹ de matéria seca

total (MST). Este tratamento apresentou valor de IHO variando entre 0,014 e 0,13 m³ m⁻³ (LEÃO *et al.*, 2006). Por sua vez, pastagem de capim Tanzânia manejada em sistema de pastejo rotacionado (7 dias de pastejo e 35 dias de descanso) com taxa média de lotação de 4,80 UA ha⁻¹ no período chuvoso e resíduo de forragem variando de 2,0 a 2,50 Mg ha⁻¹ de MST, apresentou solo com maior estado de degradação estrutural, verificado pelo IHO variando de 0,08 a 0,00 m³ m⁻³ e com 40% dos valores de Ds superiores à densidade do solo crítica (Dsc) (LEÃO *et al.*, 2006). Nesse tratamento a θ necessária para manutenção da RP em valores não superiores ao valor crítico de 3,0 MPa foi próxima da θ_{cc} , e no valor de Ds de 1,43 Mg m⁻³ igualou-se a θ_{cc} (IHO = 0). Diferentemente, o pastejo contínuo, apesar de ter sido afetado pela θ_{RP} , não apresentou Dsc.

Esses resultados sugerem que o IHO de solos leves sob pastagem pode ser afetado pelas combinações de efeitos de taxa de lotação, massa de resíduo e espécie forrageira. Provavelmente a menor taxa de lotação em sistema de pastejo contínuo tenha contribuído para os melhores resultados de IHO observados pelos autores. No sistema rotacionado, o período de descanso de 35 dias pode não ter sido suficiente para reverter os impactos da elevada taxa de lotação sobre a estrutura do solo, apesar de Costa *et al.* (2013) argumentarem que o período de descanso contribui para mitigar os impactos do pisoteio animal sobre o solo em sistema de pastejo rotacionado.

A influência da espécie forrageira na magnitude das alterações das propriedades físico-hídricas do solo tem relação com o grau de cobertura do solo proporcionado pelas gramíneas, o que está relacionado com seu hábito de crescimento (LEÃO *et al.*, 2004). Pastagens com espécies de crescimento cespitoso, como o capim Tanzânia utilizado por estes autores em pastejo rotacionado, concentram a maior parte do pisoteio animal na posição entre touceiras, conforme verificado por Costa *et al.* (2013) em pastagem de capim Milênio. Estes autores constataram maior RP e menor umidade na posição entre touceiras devido à concentração do pisoteio animal nessa posição. Portanto, em solos arenosos é recomendável que as pastagens sejam formadas por espécies com hábito de crescimento decumbente para aumentar a proteção física do solo e reduzir os impactos do pisoteio.

De modo geral, a produtividade de cana-de-açúcar em solos leves é inferior à obtida em solos argilosos, conforme verificado por Barbosa *et al.* (2018). Isto implica em uma menor quantidade de resíduos adicionados na superfície do solo por ocasião

das colheitas mecanizadas (SOUZA *et al.*, 2005). Consequentemente, menor é a proteção mecânica conferida pelos resíduos às pressões exercida pelas máquinas (MORAES *et al.*, 2022), resultando num ciclo vicioso de degradação (LUZ *et al.*, 2022), com aumentos na Ds e RP, diminuição da porosidade (COLLARES *et al.*, 2006) e do IHO.

A manutenção da qualidade estrutural de solos leves sob canaviais submetidos à colheita mecanizada parece depender do sistema de preparo do solo adotado por ocasião do plantio ou replantio do canavial, e do controle do tráfego de máquinas durante a colheita. Luz *et al.* (2022) avaliaram a qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa cultivado com cana-de-açúcar, após cinco operações de colheita. Os tratamentos consistiram de preparo convencional do solo e tráfego aleatório de máquinas na colheita (PC + TA); preparo reduzido com tráfego aleatório de máquinas na colheita (PR + TA); e preparo reduzido com tráfego controlado de máquinas na colheita (PR + TC). A colheita no tratamento PR + TC foi realizada manualmente para avaliar faixas livres de tráfego, simulando o uso de colhedoras com maior distância entre eixos, já que os autores não dispuseram de colhedora adequada ao tratamento. Foi constatada redução do IHO no sentido PC + TA = PR + TA > PR + TC, que apresentaram valores médios de 0,025, 0,033 e 0,077 m³ m⁻³, respectivamente, influenciada fortemente pela θ_{RP} . Portanto, o tratamento PR + TC foi o que apresentou melhores condições físico-hídricas, devido à menor Ds e maior porosidade, comparativamente ao PC + TA e PR + TA. Ademais, a Dsc (IHO = 0,00) foi atingida no valor de Ds de 1,79 Mg m⁻³ no PR + TC, no qual apenas 2,5 % das amostras apresentaram Ds > Dsc. Já em PC + TA e PR + TA a Dsc foi alcançada em valores mais baixos, 1,74 e 1,75 Mg m⁻³, respectivamente. Nestes, mais de 50 % das amostras apresentaram Ds > Dsc, indicativo de severa degradação estrutural do solo, conforme ressalta Cavalieri *et al.* (2006).

Esses resultados sugerem que o preparo reduzido com revolvimento apenas na linha de plantio, associado ao controle do tráfego de máquinas é uma alternativa para mitigar os impactos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar sobre os atributos determinantes do IHO em solos arenosos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que, dependendo do sistema de uso e de manejo, a densidade, a porosidade e o intervalo hídrico ótimo de solos leves sofrem alterações em taxas e direções que podem comprometer o estado de conservação desses solos e sua capacidade produtiva. Sistemas de produção que envolvem a rotação de culturas, o uso de plantas de cobertura com sistema radicular profundo associado às práticas mecânicas como escarificação e subsolagem, favorecem a redução da densidade, aumento da porosidade e do intervalo hídrico ótimo. O manejo adequado visando incrementar os teores de matéria orgânica, o controle do tráfego de máquinas e o ajuste da taxa de lotação animal em função da oferta de forragem, são estratégias de manejo que podem manter os benefícios associados à adoção de sistema plantio direto e de sistemas de produção integrada em solos leves.

Devido ao processo de reconsolidação, o preparo convencional pode não ser suficiente para manter as condições físicas adequadas para as plantas, e dependendo do manejo do solo após o revolvimento, a mobilização pode ter efeito negativo no estado de conservação de solos leves. Portanto, preconiza-se que o preparo convencional seja empregado com cautela.

Finalmente, sugere-se que outros trabalhos de revisão sejam realizados e abordem os impactos do uso agrícola sobre as propriedades físicas de solos leves, e reúnam resultados de trabalhos envolvendo outros indicadores e outros sistemas de uso e de manejo, para ampliar e reunir informações que possam apoiar as decisões de manejo desses solos para uma exploração agrícola sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300013>.
- ALMEIDA, W. S. *et al.* Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1110-1119, 2016. DOI: [10.1590/S0100-204X2016000900010](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900010).
- ARAÚJO, F. S. *et al.* Physical quality of a yellow latossol under integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 717-723, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300013>.
- BARBOSA, L. C. *et al.* Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 13, p. 15-25, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>.
- BARBOSA, L. C. *et al.* Untrafficked furrowed seedbed sustains soil physical quality in sugarcane mechanized fields. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 2150-2164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.1310>.
- BARBOSA, L. R. *et al.* Physical-hydraulic properties of an ultisol under no-tillage and crop-livestock integration in the Cerrado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 35, n. 2, p. 460-469, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252022v35n221rc>.
- BATISTA, P. H. D. *et al.* Impact of short-term grazing on physical properties of Planosols in Northeastern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00234>.
- BATISTA, P. H. D. *et al.* Assessment spatial soil physical properties under rotational cattle grazing in Northeastern Brazil. **Catena**, v. 240, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108002>.
- BLAINSKI *et al.* Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007>.
- CARNEIRO, L. F. *et al.* Alternative sugarcane production for conservation of sandy soils: sugarcane straw, intercropping and nitrogen. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 44, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202044009920>.
- CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>.

CAVALIERI, K. M. V. *et al.* Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, 137-147, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100014>.

CAVALIERI, K. M. V. *et al.* Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n.5, p. 1541-1549, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500008>.

COLLARES, G. L. *et al.* Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100013>.

CORDEIRO, C F. S. *et al.* Cover crop increases soybean yield cropped after degraded pasture in sandy soil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 8, p. 514-521, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p514-521>.

CORDEIRO, C. F. S. *et al.* Cover crops and controlled-release urea decrease nitrogen mobility and improve nitrogen stock in a tropical sandy soil with cotton cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210113>.

DONAGEMMA, G. K. *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016. DOI: [10.1590/S0100-204X2016000900001](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001).

FIDALSKI *et al.* Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 11, p. 1583-1590, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001100018>.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de *Brachiaria ruziziensis*, em sistema integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 775-783, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300024>.

GALARZA, R. M. *et al.* Changes in physical and hydraulic properties in sandy soils of the Pampa Biome under different uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0230032, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230032>.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION: Filosofia da informação**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73>.

GUIMARÃES, R. M. L. *et al.* Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1512-1521, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600008>.

HOLTHUSEN, D. *et al.* Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and**

Tillage Research, v. 177, p. 113-124, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.003>.

IMHOFF, S. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 11-18, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100002>.

LEÃO, T. P. *et al.* Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, v. 88, p. 279-285, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.014>.

LEÃO, T. P. *et al.* Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, 415-423, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300002>.

LUCA, E. F. *et al.* Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200033>.

LUZ, F. B. *et al.* Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields. **Soil and Tillage Research**, v. 233, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105459>.

MENTGES, M. I. *et al.* Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 3, p. 315-321, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300012>.

MORAES, L. A. A.; TAVARES FILHO, J.; MELO, T. R. Different managements in conventional sugarcane reform in sandy soils: effects on physical properties and soil organic carbon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220017>.

NASCIMENTO, D. M. *et al.* Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil And Tillage Research**, v. 186, p. 292-299, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.016>.

PEREIRA, F. S. *et al.* Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 211-218, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100021>.

REICHERT, J. M. *et al.* Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 3, p. 310-319, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>.

REICHERT, J. M. *et al.* Is cassava yield affected by inverting tillage, chiseling or additional compaction of no-till sandy-loam soil? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200134>.

REINERT, J. D. *et al.* Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>.

RIBEIRO, K. D. *et al.* Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de seis classes de solos da região de Lavras - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033>.

RIBEIRO, P. L. *et al.* Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1484-1491, 2016. DOI: [10.1590/S0100-204X2016000900047](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900047).

SALES, L. E. O. *et al.* Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 667-674, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300020>.

SANTOS, R. S. *et al.* Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, v. 400, n. 115.149, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>.

SARMENTO, P. *et al.* Atributos químicos e físicos de um Argissolo cultivado com *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR 86 Milênio, sob lotação rotacionada e adubado com nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 183-193, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100018>.

SENA, K. N. *et al.* Forest harvest management systems and residual phytomass affecting physical properties of a sandy soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200190>.

SILVA, A. P. *et al.* Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100001>.

SILVA, J. F. G. *et al.* Chemical and physical-hydric characterisation of a Red Latosol after five years of management during the summer between-crop season. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1576-1568, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500023>.

SILVA, P. C. G. *et al.* No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk. **Field Crops Research**, v. 258, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107947>.

SILVA, R. F. *et al.* Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo Vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2435-2441, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600021>.

- SOUZA, Z. M. *et al.* Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 3, p. 271-278, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300011>.
- SORATTO, R. P. *et al.* Doses e fontes alternativas de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo arenoso. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 62-70, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000100007>.
- STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>.
- TAVANTI, R. F. R. *et al.* Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00232>.
- TORMENA, C. A. *et al.* Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 65-71, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000100010>.
- VALANI, P. G. *et al.* Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Fdoierralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 220, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>.