UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM PLANOSSOLO SOB DIFERENTES USOS E MANEJOS NO AGRESTE PERNAMBUCANO, REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

IRENE MARIA SILVA DE ALMEIDA

RECIFE/PE
2022

IRENE MARIA SILVA DE ALMEIDA

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM PLANOSSOLO SOB DIFERENTES USOS E MANEJOS NO AGRESTE PERNAMBUCANO, REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida

RECIFE/PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A447i Almeida, Irene Maria Silva de
INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM PLANOSSOLO SOB DIFERENTES USOS E MANEJOS NO AGRESTE PERNAMBUCANO, REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL / Irene Maria Silva de Almeida. - 2022.
45 f. : il.

Orientador: Gledson Luiz Pontes de Almeida.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Entomologia Agrícola, Recife, 2022.

1. densidade do solo. 2. indicador de qualidade física do solo. 3. produção de volumoso. 4. resistência do solo à penetração. I. Almeida, Gledson Luiz Pontes de, orient. II. Título

CDD 632.7

IRENE MARIA SILVA DE ALMEIDA

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM PLANOSSOLO SOB DIFERENTES USOS E MANEJOS NO AGRESTE PERNAMBUCANO, REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

Dissertação defendida e aprovada em 31 de agosto de 2022 pela banca examinadora:

Orientador:

_____

Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Examinadores:

_____

Prof. Dr. Héliton Pandorfi
Universidade Federal Rural de Pernambuco – Deagri/UFRPE

_____

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
Universidade Federal Rural de Pernambuco – Deagri/UFRPE

_____

Dr. Renato Paiva de Lima
Universidade de São Paulo – Esalq/USP

Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal algum, pois Tu estás comigo; a tua vara e o teu cajado me protegem.

Salmos 23:4

À Deus;

Aos meus pais Ladjane Maria Silva de Almeida e Aldo Florencio de Almeida

Ao meu irmão Igor Mauro Silva de Almeida;

Ao meu esposo Deyvid José Maciel Fagundes de Lima;

Aos meus amigos que direta ou indiretamente fizeram parte desta jornada.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, por acreditar que nossa existência pressupõe outra infinitamente superior e por me encorajar a questionar as diversas realidades e propor novas possibilidades.

Aos meus pais Ladjane Almeida e Aldo Almeida, e ao meu irmão Igor Almeida, por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que até eu desacreditei.

A meu esposo Deyvid Lima, companheiro incansável, por me confortar nos momentos de angústia e me rodear de energias positivas e amor. Sem você comigo, essa jornada seria muito mais difícil.

Ao Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida, pela paciência e dedicação em me orientar. Você é um dos maiores profissionais que já conheci, se fez presente e acessível a todo momento. Gratidão pelos ensinamentos e pela confiança.

Ao Dr. Renato Paiva de Lima por toda paciência e pelas valiosas contribuições no projeto de pesquisa.

Às minhas queridas Raissa Rattes, Giselle Almeida e Ana Paula Fonseca, pela amizade e companheirismo, por me apoiarem e ajudarem com as análises laboratoriais devido às minhas limitações físicas, além de me acolherem com abraços reconfortantes e palavras incentivo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pelo ensino superior gratuito e de qualidade, por me acolher desde a graduação, sendo fundamental à minha formação pessoal e profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da (PGEA/UFRPE), pela oportunidade e pelos ensinamentos transmitidos com seriedade e compromisso através dos professores que o compõe.

A todos que fazem o Laboratório de Mecânica dos Solos, por me receberem e darem suporte, além de se preocuparem com minha saúde e sempre me tranquilizarem com palavras positivas nos momentos de insegurança.

A todos que fazem o Laboratório de Água e Solo, em especial a Thayná Almeida, pelo apoio nas análises de Matéria Orgânica.

Aos funcionários e colegas da Fazenda Experimental da UFRPE em Garanhuns, pela hospitalidade, parceria e altruísmo, que foram essenciais para que esse estudo acontecesse.

Ao Grupo de Pesquisa em Ambiência (GPESA/UFRPE), pela acolhida, apesar do isolamento social ter impossibilitado uma convivência mais próxima. Em especial à Maria Vitória, pela companhia, ajuda e alegria durante as atividades de campo e de laboratório, e à Adriano Alves, que em sua breve passagem pelo grupo, contribuiu com as atividades de campo desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da (PGEA/UFRPE).

Ao Grupo Provider, que sempre apoiou meu desenvolvimento profissional e acadêmico, flexibilizando meus horários de trabalho para que o acompanhamento das aulas e a realização das atividades de campo e de laboratório fossem possíveis. Em especial a Alessandra Lemos e a Andreia Pacheco, pelo incentivo e compreensão durante essa jornada.

Aos queridos(as) amigos(as) Maria Catiana, Carolayne Silva, Brenna Veríssimo, Fabiano Simplicio, Kenny Montalvo e Diego Castro, pelas noites e finais de semana de estudo e momentos de lazer compartilhados,

Em tempo, àqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste mestrado se tornasse possível.

Meus mais sinceros e profundos agradecimentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da região semiárida de Pernambuco e da mesorregião Agreste que a compõe. 7
Figura 2. Localização espacial da área de estudo: Brasil (A); Pernambuco (B); Garanhuns (C); Fazenda Experimental da UFRPE (D) 13
Figura 3. Áreas experimentais: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C) 14
Figura 4. Esquema de amostragem para caracterização física do solo: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C) 15
Figura 5. Esquema de amostragem das amostras indeformadas: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C) 16
Figura 6. Coleta de amostras indeformadas na área cultivada com Palma miúda (A) e (B) ... 16
Figura 7. Saturação das amostras pelo processo de ascensão capilar 17
Figura 8. Penetrômetro de bancada (A); amostra durante teste de resistência à penetração (B) 17
Figura 9. Esquema de distribuição das amostras nos potenciais matriciais: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C) 18
Figura 10. Utilização das placas porosas no extrator de Richards (A) e extrator de Richards em funcionamento (B) 19
Figura 11. Valores médios de densidade do solo (Mg m^{-3}) nos diferentes sistemas de preparo para as profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m 21
Figura 12. Conteúdo de água do solo em função da densidade nos níveis críticos da Capacidade de Campo (ψ = - 100 hPa), Ponto de Murcha Permanente (ψ = - 15000 hPa), Porosidade de Aeração crítica de 10% e Resistência à Penetração de 2,00 MPa, em função da densidade de um Planossolo nas áreas cultivadas com Palma (A); Pastejo intensivo (B); Integração lavoura-pecuária (C). 23
Figura 13. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) sob diferentes limites críticos de Densidade do Solo (Ds). 25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físicas do Planossolo das três áreas estudadas. 15
Tabela 2. Equações da curva de retenção de água no solo e resistência do solo à penetração 22
Tabela 3. Teor de carbono e matéria orgânica do Planossolo das 3 áreas experimentais, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade 26

ALMEIDA, I. M S. **Intervalo Hídrico Ótimo de um Planossolo sob diferentes usos e manejos no Agreste Pernambucano, região semiárida do Brasil**. 2022. 50 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

RESUMO

A influência do sistema de uso e manejo na qualidade física do solo tem sido evidenciado em razão de seus impactos ambientais e agronômicos. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um indicador da qualidade física solo que, por considerar diversas variáveis, pode apresentar os processos de perda ou de recuperação desta qualidade. Diante disso, objetivou-se com esta pesquisa avaliar a qualidade física de um Planossolo sob diferentes sistemas de uso e manejo na região agreste, bacia leiteira do estado de Pernambuco. Foram selecionadas três áreas para a amostragem, de acordo com o histórico de uso e manejo: área cultivada com palma miúda *Nopalea cochenillifera* há 3 anos, sem pastejo e com mecanização apenas para preparo do solo no início de cultivo (A); área de pastejo intensivo há 8 anos, coberta por forrageira do gênero *Brachiaria*, que recebe tanto bovinos quanto caprinos por sucessão (B); área de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) há 8 anos, sob preparo convencional do solo com aração e gradagem e ocupação de bovinos por sucessão (C). Foram coletadas 24 amostras indeformadas, em cada área, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade, as quais foram submetidas aos potenciais matriciais de -10, -30, -60, -100, -330, -1000, -5000 e -15000 hPa, em que foram determinadas a curva de retenção de água (CRA), a curva de resistência do solo à penetração (CRS), a densidade do solo (Ds) e o IHO. Após as análises, constatou-se que o solo da área C apresentou o maior valor de Ds na camada 0-0,10 m quando comparada com as demais áreas, o que pode estar atrelado ao pisoteio de animais, que reduz os efeitos da mobilização do solo na camada superficial. Além disso, foi observado que, apesar da ausência de diferenças estatisticamente significativas, há tendência dos solos das áreas B e C apresentarem maiores valores de Ds em relação à área de cultivo de Palma forrageira. Conforme cresce a Ds, há o aumento do IHO, até o ponto em que o conteúdo de água na resistência à penetração (θ_{RP}) substitui o conteúdo de água no ponto de murcha permanente θ_{PMP}, como observado nos solos das áreas A e B, ou até o conteúdo de água na porosidade de aeração (θ_{PA}) substituir o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), como ocorre no solo da área C. Nos solos das áreas A e B, a porosidade de aeração crítica ($\leq$ 10%) não ocorreu, todavia, no solo da área C, observou-se que a partir da Ds = 1,50 Mg m^{-3} houve redução na difusão do oxigênio no solo, o que acarreta na limitação do desenvolvimento vegetal. A densidade crítica (Dsc) foi definida pela interseção da θ_{CC} e θ_{PMP} para os solos das áreas A e B, e pela interseção da θ_{PA} e θ_{RP} no solo da área C. Identificou-se que o IHO está positivamente relacionado com a densidade do solo até valores de Ds = 1,48 Mg m^{-3}, Ds = 1,47 Mg m^{-3} e Ds = 1,51 Mg m^{-3} para os solos das áreas A, B e C, respectivamente, com RP crítica de 2,00 Mpa, passando a ser negativamente relacionado quando os valores são superiores aos mencionados.

Palavras-chave: densidade do solo, indicador de qualidade física do solo, produção de volumoso, resistência do solo à penetração.

ALMEIDA, I. M S. **Least Limiting Water Range of a Planosol under different uses and managements in the Agreste region of Pernambuco, semiarid region of Brazil**. 2022. 50 p. Dissertation (Master's degree in Agricutural Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco – UFRPE.

ABSTRACT

The influence of the use and management system on the soil physical quality has been evidenced due to its environmental and agronomic impacts. Least Limiting Water Range (LLWR) is an indicator of the soil physical quality, considering several variables, it can present the processes of loss or recovery of this quality. Therefore, the objective of this research was to evaluate the physical quality of a Planosol under different systems of use and management in the Agreste region, dairy basin in the state of Pernambuco. Three areas were selected for sampling, according to the history of use and management: area cultivated with *Nopalea cochenillifera* for 3 years, without grazing and with mechanization only for the beginning of cultivation (A); area of intensive grazing for 8 years, covered by forage of the genus *Brachiaria*, which receives both cattle and goats by succession (B); crop-Livestock Integration Area (ILP) for 8 years, under conventional tillage with plowing and harrowing and cattle occupation by succession (C). Twenty-four undisturbed samples were collected in each area, in the 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m depth layers, which were subjected to matrix potentials of -10, -30, -60, -100 , -330, -1000, -5000 and -15000 hPa, where the water retention curve (WRC), the soil penetration resistance curve (PRC), soil bulk density (BD) and the LLWR. After the analyses, it was found that area C had the highest soil density value in the 0.00-0.10 m layer when compared to the other areas, which may be linked to animal traffic, which reduces the effects of soil mobilization in the layer superficial. Furthermore, it was observed that, despite the absence of statistically significant differences, there is a tendency for areas B and C to present higher values of soil bulk density in relation to the area of palm cultivation. As soil bulk density grows, there is an increase in the LLWR, up to the point where soil penetration resistance (θ_{SRP}) replaces permanent wilting point (θ_{WP}), as observed in soils A and B, or until the critical levels of air-filled porosity (θ_{AFP}) replaces the field capacity (θ_{FC}), as in area C. In areas A and B, the air-filled porosity ($\leq$ 10%) did not occur, however, in area C, it was observed that from Ds = 1.50 Mg m^{-3} there was a reduction in the diffusion of oxygen in the soil, which leads to the limitation of development vegetable. The critical soil bulk density was defined by the intersection of θ_{FC} and θ_{WP} for areas A and B, and by the intersection of θ_{AFP} and θ_{SRP} in area C. It was identified that the LLWR is positively related to the soil bulk density up to values of 1.48 Mg m^{-3}, 1.47 Mg m^{-3} and 1.51 Mg m^{-3} for areas A, B and C, respectively, with a critical SRP of 2.00 MPa, passing to be negatively related when the values are higher than those mentioned.

Key words: forage production, soil bulk density, soil penetration resistance, soil physical quality indicator.

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2019), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite. Fato que está associado às características do semiárido brasileiro, que dispõe de condições naturais propícias à produção de volumosos, alimentos com alto teor de fibra bruta e baixo valor energético, considerados o principal alimento dos ruminantes (REIS FILHO, 2013), o que confere à região grande potencial para o desenvolvimento de atividades pecuárias, especialmente a bovinocultura de leite.

A produção de ruminantes no Brasil ocorre predominantemente sob o regime de pastagens, entretanto, os índices produtivos obtidos na maioria das produções à pasto encontram-se abaixo do potencial existente (CARVALHO, 2021), o que estimula a exploração de novas áreas de pastejo em detrimento à adoção de tecnologias efetivas nas áreas já estabelecidas para o aumento da produtividade (SANTOS et al., 2019).

Quando a pastagem é oriunda do cultivo de forrageiras, a produção estacional surge também como outro fator limitante e comprometedor do desempenho animal nas épocas desfavoráveis à produção de volumosos (SANTOS et al., 2020).

Em Pernambuco, a produção leiteira está concentrada na região Agreste, com a nutrição dos ruminantes baseada em forrageiras cultivadas e vegetação nativa, principalmente a caatinga, o que atribui características estacionais aos sistemas produtivos. Nesse contexto, o extenso período de seca que ocorre no semiárido (PEREIRA et al., 2017) promove a redução na quantidade de volumosos disponíveis para alimentação dos rebanhos, sejam estes provenientes de pasto e campineiras desenvolvidos durante o período chuvoso ou do cultivo de palma forrageira, vulnerabilizando os sistemas agropecuários.

Diante disso, um dos desafios da pesquisa no setor agropecuário é caracterizar manejos adequados que reduzam ou cessem a degradação das áreas de pastagem, uma vez que o emprego de práticas agrícolas desencadeia alterações nos atributos físicos do solo (FREITAS et al., 2017) e que os fatores inerentes ao seu uso e manejo podem interferir nas propriedades físicas que definem a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. A avaliação destas alterações permite a compreensão das potencialidades e das limitações de uso do solo (SILVA et al., 2020a). Assim, entender as necessidades dos ambientes produtivos para amenizar o processo de degradação e, consequentemente, reduzir a demanda por novas áreas para a produção animal, é indispensável para o atendimento das necessidades locais sem comprometimento dos recursos naturais.

O IHO derivou da proposta de Letey (1985), que criou o conceito de “amplitude hídrica não limitante”, que integra as relações entre atributos do solo e disponibilidade de água para as plantas, definido posteriormente por Tormena et al. (1998) como a faixa de teor de água no solo onde as limitações para o crescimento vegetal em função do potencial matricial, aeração e resistência do solo são nulas. Silva et al. (1994) aprimoraram este conceito ao reunir modelos matemáticos para estimar o teor de água do solo quanto à capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade da aeração (PA) e resistência do solo à penetração (RP), propondo um indicador da qualidade estrutural do solo para o crescimento vegetal denominado Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), que integra propriedades essenciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal às limitações dos fatores de resposta das culturas, permitindo a quantificação de mecanismos, processos de perda e recuperação da qualidade física do solo em função da densidade aparente (TORMENA et al., 1998; GUIMARÃES et al., 2013; TORMENA et al. 2017; MOURA et al. 2021).

Tal mecanismo de avaliação e monitoramento da condição física do solo é uma forma de compreender o solo do semiárido brasileiro para que seja alcançado o equilíbrio produtivo e ambiental, conforme os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil (ODS), através da implementação de práticas agrícolas resilientes que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo.

Diante disso, esta pesquisa propõe a utilização do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como indicador de qualidade física do solo, identificando os limites de água disponível do solo (AD) através da densidade do solo de alerta (Ds_a) e densidade do solo crítica (Ds_c), valores de densidade do solo (Ds) definidos pelo excesso de resistência do solo à penetração ou pela redução na porosidade de aeração.

2. HIPÓTESES

- Os diferentes sistemas de uso e manejo do Planossolo na região agreste de Pernambuco, ocasionam variação nos valores do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), o que revelará o grau de degradação física de áreas cultivadas com palma miúda, pastejo intensivo e integração lavoura-pecuária..
- A área de Integração Lavoura-pecuária apresenta o menor Intervalo Hídrico Ótimo, considerando o uso de maquinário e a presença de animais por sucessão neste ambiente.

- A área de Pastejo Intensivo apresenta o segundo menor IHO, uma vez que a área nunca recebeu cultivo ou revolvimento do solo e está propensa à compactação devido a presença dos animais.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Avaliar a qualidade física de um Planossolo sob diferentes sistemas de uso e manejo na região agreste, bacia leiteira do estado de Pernambuco, empregando o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como indicador.

3.2. Específicos

- Determinar o Intervalo Hídrico Ótimo para o Planossolo sob diferentes sistemas de uso;
- Quantificar a influência dos sistemas de uso e manejo do solo sobre qualidade física do solo;
- Estabelecer os valores de densidade do solo de alerta (Ds_a) e densidade do solo crítica (Ds_c) para avaliação e monitoramento da condição física do solo.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Panorama de uso e ocupação do solo no Agreste pernambucano

Os efeitos de mudanças no uso e na cobertura do solo estão associados a alterações climáticas locais ou globais, hidrológicas, perda de biodiversidade e de qualidade do solo (LOVELAND et al., 1999; ACIOLLY et al., 2017), respondendo, majoritariamente, pelos efeitos maléficos e benéficos das ações antrópicas.

Nas regiões semiáridas, o principal impacto ambiental de alterações no uso e na cobertura do solo é a desertificação. Em Pernambuco, a derrubada da caatinga para a implantação de culturas e pastagens associada ao manejo inadequado do solo e dos rebanhos, podem ser apontados como os principais fatores responsáveis pela desertificação no estado (ACCIOLY, 2000).

Nos estudos realizados por Aciolly et al. (2017) foi identificado que o Agreste pernambucano (Figura 1) apresenta aproximadamente 42% da sua área ocupada com algum tipo de vegetação nativa, sendo predominante as áreas de caatinga aberta, justificada pelo relevo movimentado nesta mesorregião.

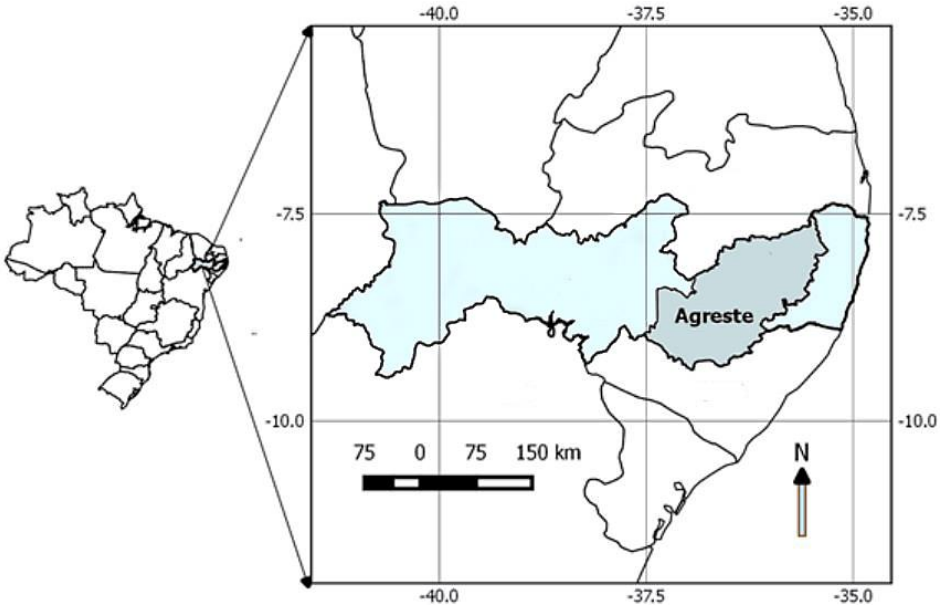

Figura 1. Localização da região semiárida de Pernambuco e da mesorregião Agreste que a compõe.

No que tange às áreas antropizadas, os autores destacaram as áreas classificadas como agricultura e pastagem que, quando somadas, respondem por aproximadamente 54% da área do Agreste, sendo que as pastagens ocupam cerca de 33% desta área. Além disso, também foi observado que as áreas de pastagem se concentram nos municípios de Garanhuns, Caruaru e Venturosa, que compõem a maior parte da bacia leiteira do estado, todos com áreas superiores a 100.000 ha ocupados com sistemas produtivos.

A cadeia produtiva do leite e laticínios tem participação significativa na economia rural de Pernambuco, e mais de 60 municípios do Agreste pernambucano vêm contribuindo para colocar o estado como o segundo maior produtor do Nordeste (SILVA et al., 2018). De acordo com Carvalho (2021), na maioria das áreas da bacia leiteira, há predomínio da utilização de gramíneas em monocultivo, com identificação de aumentos crescentes da degradação desses pastos, o que enfatiza o estudo de sistemas de produção com maior potencial sustentável como uma lacuna para a pecuária da região.

4.2. Caracterização dos Planossolos no Agreste pernambucano

Por definição, os Planossolos são constituídos por material mineral com horizontes superficiais A ou E, seguido do horizonte subsuperficial B com transição textural comumente abrupta (NEVES, 2018). O horizonte superficial possui textura arenosa e permeável e o subsuperficial, argilosa e quase impermeável, devido a presença de argila de alta atividade que o confere uma drenagem inadequada e susceptibilidade à compactação.

Os Planossolos são bastante comuns na região nordeste do Brasil. Em Pernambuco, abrangem uma extensão de aproximadamente 15.830 km^2, que corresponde a 16% da superfície do estado (ARAÚJO FILHO et al., 2017; NEVES, 2018) e ocorrem com maior frequência no Agreste e no Sertão – regiões semiáridas. Nestas regiões os Planossolos assumem grande importância econômica tanto pela magnitude de ocupação ao compreender aproximadamente 5.743,2 km^2; correspondentes à 5,78% do total da área do estado, quanto pela utilização intensiva em atividades agropecuárias (PARAHYBA et al., 2010). Também são bastante utilizados na agricultura familiar sem uso de irrigação nos cultivos de palma forrageira, milho, sorgo, feijão e pastagens (BRASIL, 1973; TEIXEIRA et al. 2017), sobretudo pelas condições ambientais e do próprio solo favorecerem vigência periódica de excesso de água, mesmo que de curta duração (SOUZA et al. 2013; NEVES, 2018).

Segundo Parahyba et al. (2009), apesar de habitualmente possuir condições de fertilidade natural de razoáveis a boas, os Planossolos presentes no Agreste de Pernambuco apresentam fortes limitações ao uso agrícola, especialmente no que diz respeito às condições físicas e à suscetibilidade à erosão. Para os autores, as principais limitações ao uso agrícola destes solos derivam justamente do adensamento do horizonte B, que são agravadas quando este se encontra muito próximo à superfície do solo. Essa característica tem relevância ambiental e agronômica porque, além de limitar a drenagem interna de água, prejudica o desenvolvimento radicular das plantas e resulta na diminuição da cobertura vegetal (NEVES, 2018).

4.3. Qualidade física do solo

O solo é um dos componentes básicos para manutenção da vida animal e vegetal, onde atua como um armazém de água e outros suplementos essenciais e, de acordo com Bai et al. (2018), é reconhecido como um recurso não renovável pois, uma vez degradado, sua regeneração é lenta.

De acordo com Teixeira et al. (2017), para o uso adequado do solo, é necessária a avaliação prévia das suas potencialidades e limitações, que inclui a identificação dos horizontes e as descrições morfológicas, físicas e químicas, com vistas ao impedimento da deterioração dos atributos físicos e econômicos, especialmente, estrutura e agregação.

Segundo Tormena et al. (2017) e Tavanti et al. (2019), um solo com boa qualidade física dispõe de aeração, água e resistência mecânica não impeditiva à proliferação de raízes, fatores que se relacionam estreitamente com o uso e manejo do solo, que são alterados na presença de processos degradantes como erosão, desertificação e compactação (HUBERT et al., 2007;

TORMENA et al., 2017). Assim, a mensuração dos impactos causados pelo uso e manejo na qualidade física do solo deve envolver atributos determinantes dos processos físicos que interferem nos aspectos fisiológicos ligados ao crescimento e desenvolvimento vegetal (GUIMARÃES et al., 2013).

Qualidade física do solo refere-se, em uma perspectiva agrícola, à capacidade que o solo apresenta em sustentar o desenvolvimento das culturas sem que se degrade (ACTON; GREGORICH, 1995; TORMENA et al., 1998; FUENTES-LLANILLO et al., 2013; SILVA et al., 2020a). Doran e Parkin (1994) aprofundaram a definição e defenderam que a qualidade física se refere à capacidade de atuação do solo nos limites de ecossistema e utilização para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal. Assim, é possível avaliar a qualidade do solo tanto para agroecossistemas, onde o principal objetivo, embora não exclusivo, é a produtividade, quanto para ecossistemas naturais onde os enfoques são a manutenção da qualidade ambiental e a preservação da biodiversidade (BÜNEMANN et al., 2018).

Segundo Tormena et al. (1998) a quantificação e a compreensão do impacto das práticas agrícolas sobre a qualidade física do solo são fundamentais no desenvolvimento de sistemas sustentáveis, devido às alterações nos atributos físicos ocasionadas pelo uso e manejo empregados. Essas alterações contribuem para o processo de degradação do solo e demandam o monitoramento da qualidade física para o planejamento e a implementação de práticas conservacionistas de manejo (NORTCLIFF, 2002; LIMA et al., 2013; BÜNEMANN et al., 2018; BURGREVER et al., 2019), vista a influência que a degradação do solo possui sobre a produtividade das culturas.

A degradação física compõe o processo de deterioração do solo e geralmente está associada à perda de matéria orgânica e de integridade estrutural, redução da porosidade total e da infiltração de água no solo, o que implica em alterações nas propriedades que controlam processos fundamentais relacionados às dinâmicas de água, ar, calor (FEDDEMA, 1998; LOURENTE et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2013; SILVA et al., 2020a) e crescimento de raízes.

Geralmente, os solos reagem lentamente às mudanças causadas pelo uso e manejo empregados, o que dificulta a detecção de mudanças na qualidade física do solo antes da ocorrência de danos irreversíveis (NORTCLIFF, 2002; GUIMARÃES et al. 2013; BÜNEMANN et al., 2018). Assim, a mensuração dos impactos sobre a qualidade física do solo deve considerar atributos integrantes dos processos físicos que interferem nos aspectos fisiológicos ligados ao crescimento e ao desenvolvimento vegetal. De acordo com Islam e Weil

(2000) na avaliação da qualidade física do solo, é importante considerar propriedades não tão estáveis a ponto de serem insensíveis às práticas de manejo, nem tão sensíveis a ponto de não indicar alterações na estrutura do solo à longo prazo. A avaliação dessa qualidade pode ser feita por meio da determinação da densidade do solo, da porosidade de aeração e da resistência mecânica do solo à penetração (TORMENA et al., 2017).

De acordo com Souza et al. (2013) as variações nas características e composições dos solos – morfológicas, físicas, químicas e biológicas – os atribuem diferentes potenciais de uso e devem ser utilizados adequadamente para a obtenção de um arranjo produtivo equilibrado, visto que o uso e manejo indiscriminados do solo o suscetibiliza à degradação e à redução da biodiversidade e da produtividade.

A compactação é uma das principais causas da degradação do solo e consequente redução de sua qualidade física. Segundo Burgrever et al. (2019) a formação de camadas compactadas proporciona maior resistência física à expansão radicular e alterações na distribuição e tamanho dos poros. Outros exemplos de ofensores à qualidade física do solo são as queimadas, o preparo inadequado, o emprego da monocultura por longos períodos, a utilização de fertilizantes sem análise prévia e a ausência de práticas de manejo e conservação do solo e da água.

O conceito de qualidade do solo inclui a avaliação de propriedades e processos do solo por se relacionarem com sua capacidade de funcionar efetivamente como componente de um ecossistema saudável (BÜNEMANN et al., 2018). De acordo com a Teixeira et al. (2017) para o uso adequado do solo é necessária a avaliação prévia das suas potencialidades e limitações, que inclui a identificação dos horizontes e as descrições morfológicas, físicas e químicas, com vistas no impedimento da deterioração dos atributos físicos e econômicos, especialmente, estrutura e agregação.

4.4. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como indicador de qualidade física do solo

A avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores é um instrumento valioso e eficaz na definição da capacidade de manutenção do sistema produtivo. Segundo Silva et al. (2020b), os indicadores de qualidade do solo são atributos mensuráveis, qualitativos ou quantitativos, capazes de medir ou refletir o status ambiental ou a condição de sustentabilidade do solo, sendo amplamente utilizados para caracterizar a condição ambiental de áreas perturbadas. A análise desses indicadores possibilita a caracterização das áreas degradadas e o acompanhamento das alterações ocorridas no solo em função do manejo empregado (BAI et al., 2018).

A perda da qualidade física do solo é um processo gradual que se inicia com a deterioração da estrutura do solo associada a modificações nos arranjos dos agregados e dos poros (OMUTO, 2008; GUIMARÃES et al., 2013; TORMENA et al., 2017; MOURA et al., 2021). Essas mudanças interferem nas características da superfície do solo e resulta em compactação (LANZANOVA et al., 2007; STUMPF et al., 2016); mudanças na distribuição e no tamanho dos poros, redução da água disponível (DEXTER, 2004; STUMPF et al., 2016); diminuição da taxa de infiltração de água (ALVES SOBRINHO et al., 2003; PANACHUKI et al., 2011; NERY et al., 2020); perda de matéria orgânica (ÁLVARO-FUENTES et al., 2008); redução da diversidade e atividade de microrganismos (SIX et al., 2004); e aumento da suscetibilidade à erosão do solo (RICHARD et al., 2001; FU et al., 2019). Portanto, um componente importante da avaliação da qualidade do solo é a identificação de um conjunto de atributos que reflitam a capacidade de funcionamento do solo e possam ser usados como indicadores da qualidade (BÜNEMANN et al., 2018).

As propriedades físicas, frequentemente empregadas para caracterizar a condição física do solo, são a densidade do solo (Ds) e distribuição de poros (REYNOLDS et al., 2008; STUMPF et al., 2016); a retenção e disponibilidade de água (TORMENA et al., 2004); a resistência tênsil de agregados, que indica a capacidade das raízes em penetrar no solo (BLAINSKI et al., 2008; GUIMARÃES et al., 2009; STUMPF et al., 2016), a resistência à penetração (OLIVEIRA FILHO et al, 2014) e o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (BLAINSKI et al., 2009).

No entanto, ao considerar que alguns destes atributos requerem um determinado período para serem restaurados, a previsão do grau de perturbação causado pelas atividades agrícolas torna-se essencial. Apesar de não haver uma única medida indicadora da qualidade física do solo, a integração de determinados indicadores pode auxiliar na identificação (DEXTER, 2004; GUIMARÃES et al., 2013; TAVANTI et al., 2019). Nesse contexto, o IHO atua como uma ferramenta para avaliação dos efeitos do manejo do solo sobre sua produtividade potencial ao incorporar informações ligadas às mudanças na sua estrutura física devido às práticas agrícolas.

O Intervalo Hídrico Ótimo corresponde à amplitude de umidade em que as limitações de crescimento e desenvolvimento da planta oriundas de restrições físicas são mínimas, isso inclui as limitações devido à resistência à penetração e porosidade de aeração, além dos efeitos do potencial matricial e da densidade do solo. Essa amplitude apresenta os limites onde a condição estrutural do solo restringe o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Valores baixos de IHO indicam condições físicas inadequadas para a cultura (SILVA et al. 1994).

De acordo com Rodrigues et al. (2017), num solo bem estruturado, com valores de densidade moderados, a faixa de umidade ideal para o crescimento das plantas é definida pelo teor de água na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), ou seja, IHO corresponde à água disponível. Porém, com a degradação estrutural do solo, caracterizada principalmente pela compactação, ocorre a redução da porosidade total, o que torna a aeração deficiente, seja por excesso de água ou mesmo em umidades iguais ou menores do que a correspondente à CC.

Por outro lado, a resistência do solo à penetração não está relacionada apenas à umidade do solo, mas também à densidade, podendo haver valores de resistência à penetração que limitem o crescimento das plantas em umidades do solo superiores ao ponto de murcha permanente com compactação. Nesse caso, o IHO seria definido pela porosidade da aeração no limite superior e pela resistência do solo à penetração da raiz no limite inferior (LETEY 1985; SILVA et al. 1994).

Por ser um parâmetro físico do solo que incorpora limitações de crescimento da planta por aeração, água disponível e resistência mecânica do solo à penetração de raízes em uma faixa de umidade do solo, o IHO pode ser uma boa alternativa para o manejo da irrigação, promovendo uma produção ideal (TORMENA et al., 1998; GUIMARÃES et al., 2013; TORMENA et al. 2017; MOURA et al. 2021).

O IHO é definido como uma faixa de presença de água no solo onde as limitações de crescimento vegetal associadas ao potencial hídrico, aeração e resistência mecânica à penetração das raízes são pequenas (LIMA et al., 2020). O IHO agrega três fatores associados ao crescimento de plantas em função da Ds e, deste modo, se estabelece como indicador de qualidade estrutural do solo para produção vegetal, visto que o IHO é reduzido acentuadamente com o aumento da Ds (SILVA et al., 1994; ZOU et al., 2000). Para Collares et al. (2008) uma densidade do solo maior que a densidade do solo crítica ($Ds > Ds_c$) indica uma degradação física severa capaz de restringir o desenvolvimento vegetal, já a densidade do solo de alerta (Ds_a) indica a fase inicial do processo e permite a antecipação de medidas de controle para evitar condições restritivas às plantas quando a $Ds>Ds_c$. Não é obrigatória a nulidade do IHO para sinalizar a degradação física do solo, ao passo que com a redução do IHO, as variações temporal e espacial do teor de água do solo (θ) podem implicar em estresse físico às plantas, seja por restrição de aeração, quando θ é elevado, ou pela excessiva resistência do solo à penetração, em razão do secamento do solo (BLAINSKI et al., 2012; TORMENA et al., 2017). Segundo Guimarães et al. (2013), a partir do conhecimento da Ds_a e Ds_c, o monitoramento da qualidade física do solo pode ser executado de maneira simples e com custo reduzido através

de medições de Ds, visto que esta é uma propriedade física de fácil obtenção devido ao aparato instrumental simples, barato e de fácil operação.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Localização da Área de Estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental (Figura 2) pertencente à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Garanhuns, mesorregião do Agreste Meridional de Pernambuco. O local situa-se na latitude de 8º 53’ 30” S, longitude de 36º 30’ 00” W e altitude de 842 m.

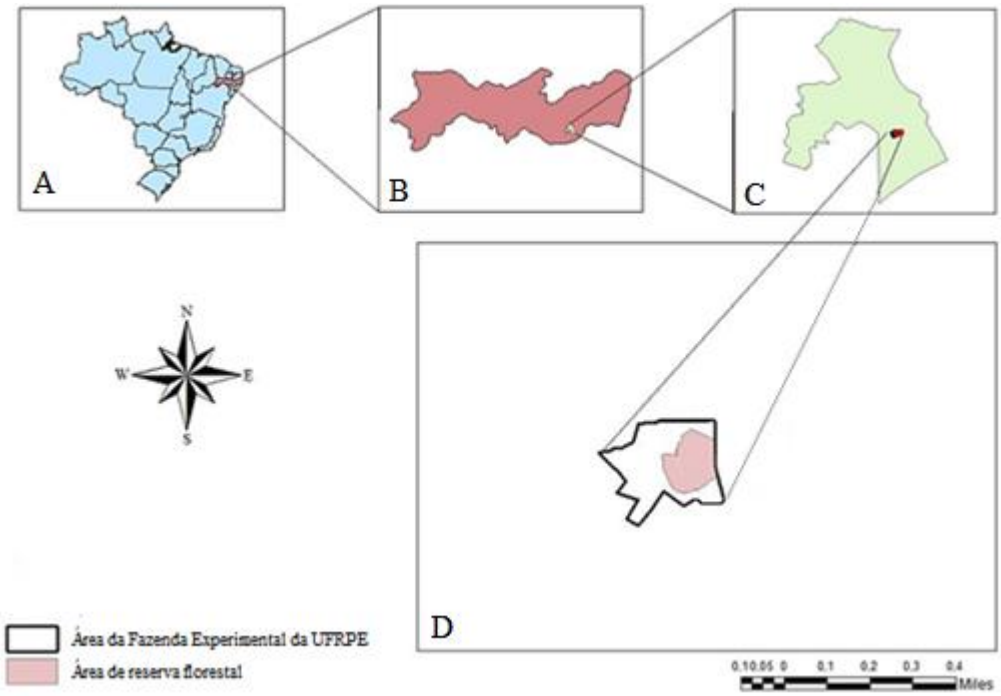

Figura 2. Localização espacial da área de estudo: Brasil (A); Pernambuco (B); Garanhuns (C); Fazenda Experimental da UFRPE (D)

O clima é semiárido, no entanto, há exceções pontuais que dependem de vários fatores, como altitude, proximidade do litoral e morfologia da área considerada (TEIXEIRA et al. 2017). Segundo a classificação de *Köeppen*, predomina, no Agreste pernambucano, o clima tropical chuvoso com verão seco e com estação chuvosa no outono (As’), e no Município de Garanhuns ocorre o clima mesotérmico com verão seco e quente continental (Cs’a) (ALVARES et al., 2013). A média anual das precipitações varia entre 650 e 900 mm, com distribuição pluviométrica irregular no tempo e no espaço e maior incidência de chuva nos meses de junho a agosto (JACOMINE et al., 1973; TEIXEIRA et al, 2017). O solo do local é classificado como

Planossolo de acordo com o Zoneamento Agroecológico de Pernambuco - ZAPE (EMBRAPA, 2022).

5.2. Características das Áreas Experimentais

Foram selecionadas três áreas para a amostragem (Figura 3), de acordo com o histórico de uso e manejo do solo: área cultivada com Palma miúda *Nopalea cochenillifera* há 3 anos, sem pastejo e com mecanização apenas para início de cultivo (A); área de pastejo intensivo há 8 anos, coberta por forrageira do gênero *Brachiaria*, que recebe tanto bovinos quanto caprinos por sucessão (B); área de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) há 8 anos, sob preparo convencional do solo com aração e gradagem e ocupação de bovinos por sucessão (C).

Foram realizadas análises estatísticas por comparação de médias dos tratamentos através do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

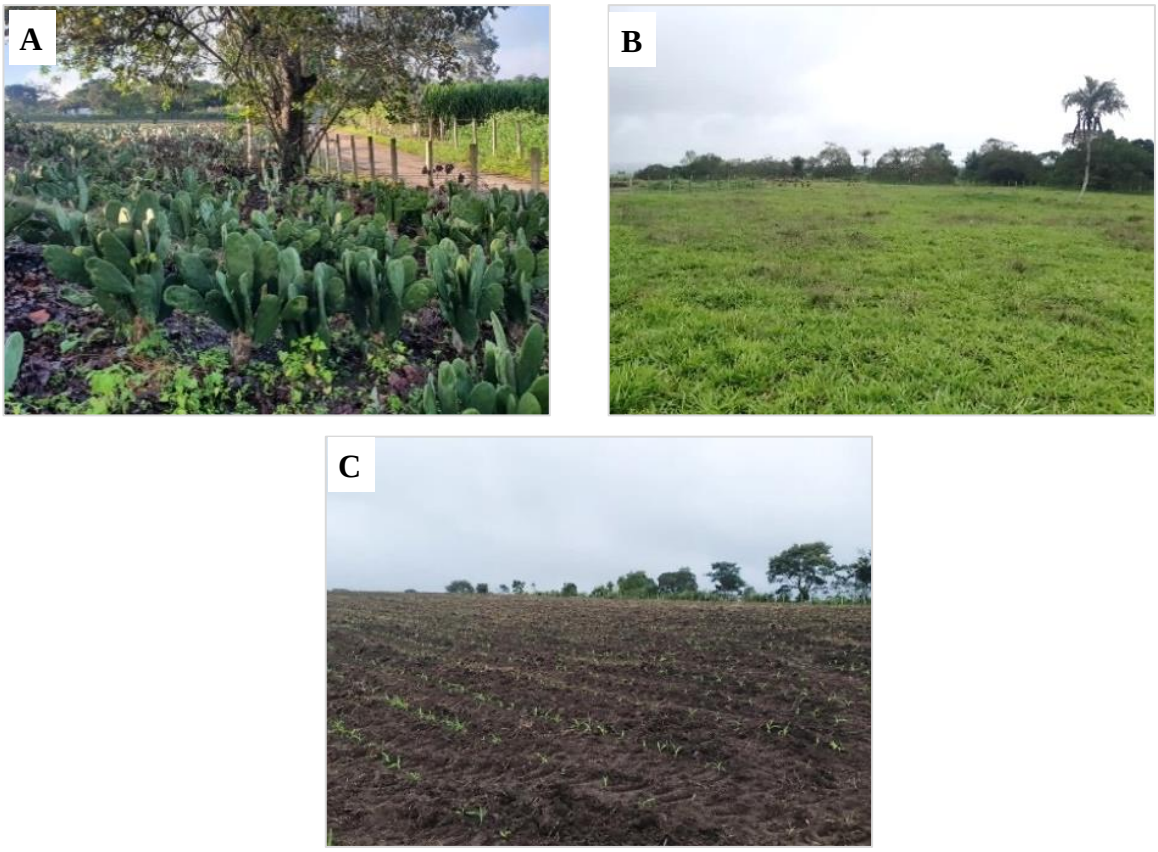

Figura 3. Áreas experimentais: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C)

5.3. Determinação das características físicas e matéria orgânica do solo

Foram selecionadas aleatoriamente 9 amostras deformadas de cada área estudada, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura 4), para determinação da caracterização física do solo.

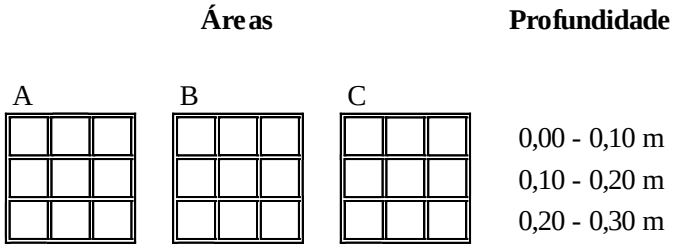

Figura 4. Esquema de amostragem para caracterização física do solo: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C)

Foram realizadas as seguintes determinações: (i) Granulometria por meio da sedimentação das partículas com a aplicação do método do densímetro (DONAGEMMA et al., 2017); (ii) Densidade do Solo determinada pelo método do cilindro volumétrico proposto por Almeida et al. (2017); (iii) Densidade de Partículas pelo método do balão volumétrico recomendado por Viana et al. (2017); (iv) Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) pelo método indicado por Silva et al. (1994).

Tabela 1. Características físicas do Planossolo das três áreas estudadas.

Tratamento	Areia total	Silte	Argila	Dp
		g/kg		Mg m^{-3}
Cultivo de Palma (A)	544,33	72,33	383,33	2,38
Pastejo Intensivo (B)	388,91	88,99	522,10	2,43
Integração Lavoura-pecuária (C)	376,40	63,70	559,90	2,38

Densidade de partículas (Dp)

A determinação dos teores de carbono e matéria orgânica total das amostras foi realizada por meio da trituração em almofariz e na oxidação da matéria orgânica por via úmida, utilizando-se solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido e avaliado por titulometria (YEOMANS; BREMER, 1988). A percentagem de matéria orgânica foi calculada multiplicando-se o resultado do carbono orgânico por 1,724. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58% (TEIXEIRA et al., 2017; FONTANA; CAMPOS, 2017).

5.4. Determinação da resistência à penetração

O teste de resistência à penetração foi realizado para a identificação do grau de compactação da superfície do solo. Em cada área selecionada, foram coletadas aleatoriamente 24 amostras indeformadas de solo, no centro das camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade (Figura 5), com o auxílio de anéis de aço inox de 0,05 m de altura e de diâmetro e de um amostrador do tipo Uhland (Figura 6).

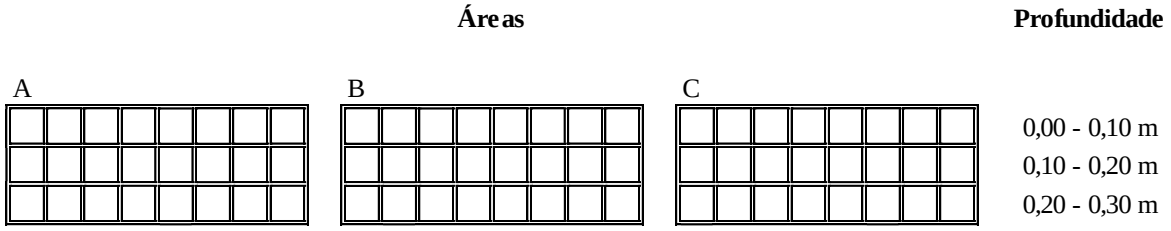

Figura 5. Esquema de amostragem das amostras indeformadas: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C)

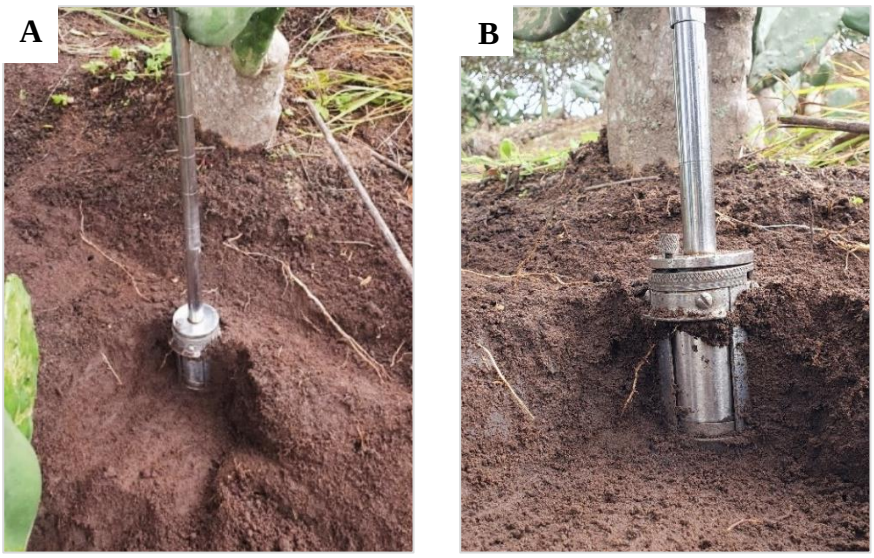

Figura 6. Coleta de amostras indeformadas na área cultivada com Palma miúda (A) e (B)

As amostras foram envolvidas por plástico filme e acondicionadas de modo a não perderem umidade nem estrutura. Em laboratório, o excesso de solo foi removido e uma tela composta por fibras de poliéster, viscose e resina foi assentada nas amostras com o suporte de elásticos a base de látex para viabilizar o fluxo ascendente de água sem perda de solo. Após preparadas, as amostras foram saturadas pela da manutenção gradual de uma lâmina de água máxima de 2/3 da altura dos anéis por 48 h (Figura 7).

Figura 7. Saturação das amostras pelo processo de ascensão capilar

Após alcançar o equilíbrio, as amostras foram utilizadas na determinação da resistência à penetração (RP) com o auxílio de um Penetrômetro eletrônico de bancada (Figura 8) com ponteira cônica de 4 mm de diâmetro basal a uma taxa de 2,5 mm/s de deslocamento.

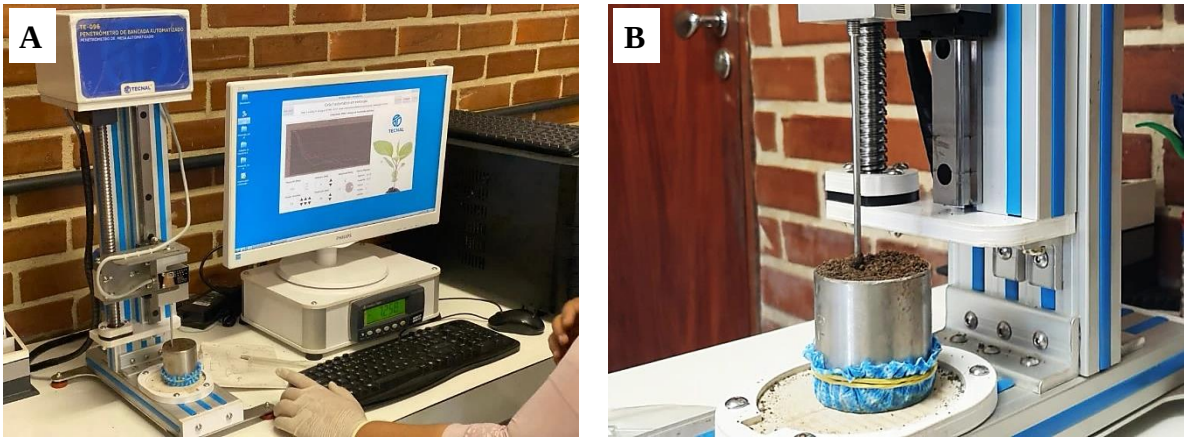

Figura 8. Penetrômetro de bancada (A); amostra durante teste de resistência à penetração (B)

Foram realizadas 4 penetrações em cada amostra e considerou-se os valores de 0,02 a 0,04 m no centro de cada núcleo e calculou-se a média entre as 4 repetições e em seguida computou-se a média das profundidades. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 ºC por 24 h determinação do conteúdo de água do solo (θ) por diferença de peso e da Ds, conforme Blake e Hartge (1986).

Nas amostras, foram determinadas a Curva de Retenção de Água no solo (CRA), a Curva de Resistência do Solo à penetração (CRS) e a Densidade do solo (Ds), que corresponde a tangente da curva característica de água no solo no ponto de inflexão (DEXTER, 2004).

Para a determinação da CRA, foi adotado procedimento descrito em Silva et al. (1994). Foram considerados 8 grupos de potencial matricial (Ψ) distintos (-10 hPa, -30 hPa, -60 hPa, -100 hPa, -330 hPa, -1000 hPa, -5000 hPa e -15000 hPa), cada um com 3 repetições por profundidade, ou seja, 24 amostras por sistema de manejo e 72 amostras no total do experimento (Figura 9).

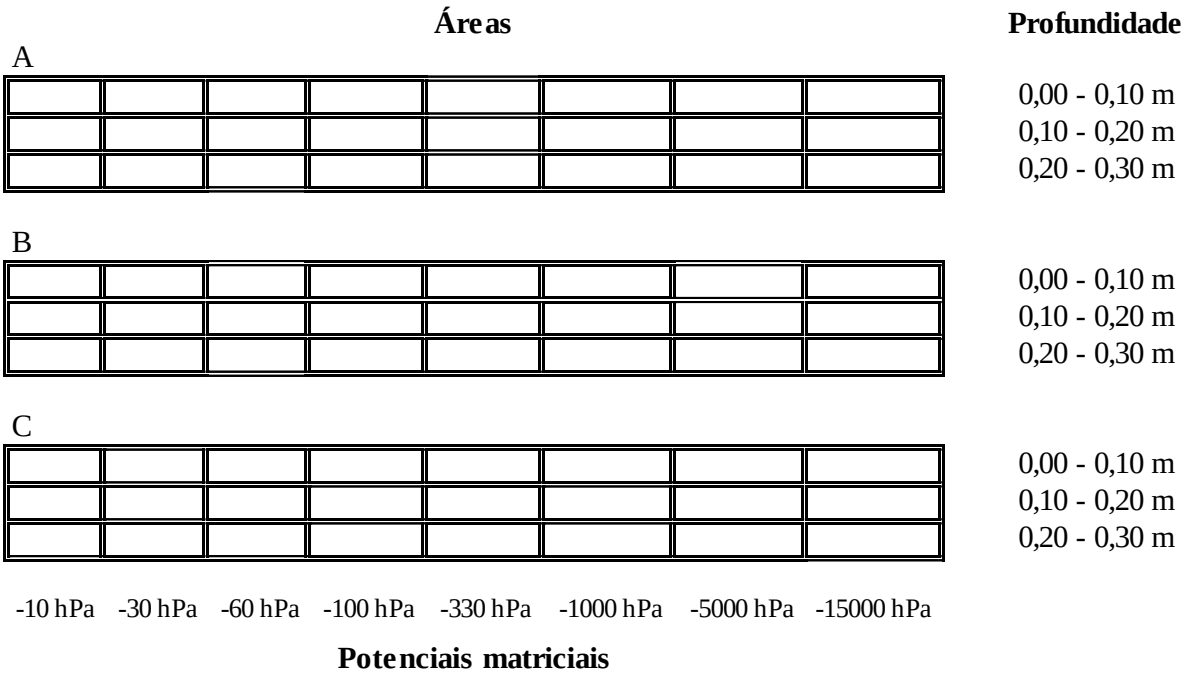

Figura 9. Esquema de distribuição das amostras nos potenciais matriciais: cultivo de palma (A); pastejo intensivo (B) e integração lavoura-pecuária (C)

Para os potenciais matriciais baixos (até -100 hPa) foi utilizada a mesa de tensão, para a determinação dos potenciais matriciais superiores, utilizou-se as placas porosas no extrator de Richards (Figura 10) conforme Dane e Hopmans (2002), onde extração de água ocorre por diferença de potencial entre a placa porosa e a amostra de solo e o fluxo de água reduz exponencialmente ao passo que o potencial matricial se torna mais negativo (RICHARDS, 1965).

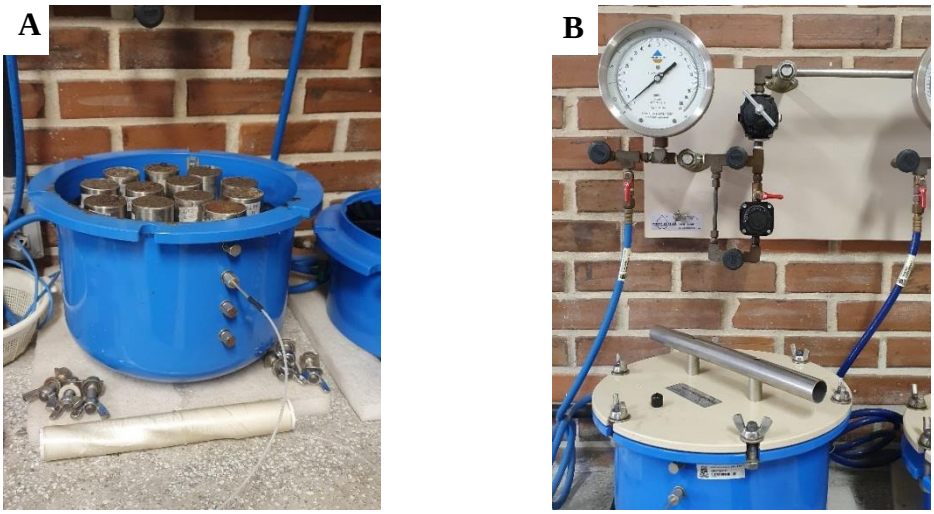

Figura 10. Utilização das placas porosas no extrator de Richards (A) e extrator de Richards em funcionamento (B)

5.5. Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Para a determinação do IHO, a CRA e CRS foram descritas matematicamente para cada sistema de uso e manejo. A CRA, expressa pela relação entre Ψ e θ, foi ajustada utilizando a equação proposta por Silva et al (1994) (Eq. 1):

$$\theta = \exp\,(a + b\,.\,Ds)\,\Psi^{c} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

em que:

θ corresponde ao conteúdo de água do solo ($m^3\,m^{-3}$);

Ds é a densidade do solo ($Mg\,m^{-3}$);

Ψ é o potencial matricial (hPa);

a, *b*, *c* são parâmetros de ajuste de equação.

Os coeficientes do modelo foram determinados iterativamente no ajuste do modelo aos dados, utilizando-se a rotina no programa R (R CORE TEAM, 2020).

A CRS, descrita pela relação funcional entre RP, Ds e θ, foi obtida pelo ajuste dos dados ao modelo não linear proposto por Busscher (1990), (Eq.2), individualmente para cada sistema de uso e manejo:

$$RP = a\,.\,Ds^{b}\,.\,\theta^{c} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

em que:

RP é a resistência do solo à penetração (MPa);
θ, o conteúdo de água do solo ($m^3\ m^{-3}$);
Ds, a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);
a, *b* e *c* são os coeficientes do modelo.

A equação foi linearizada e o ajuste do modelo da CRS foi feito por meio de rotina empregando o programa R (R CORE TEAM, 2020).

O Intervalo Hídrico Ótimo foi determinado conforme Tormena et al. (1998). Os valores críticos de θ em que o crescimento das culturas é influenciado pelo Ψ, RP e porosidade de aeração (PA) serão obtidos na capacidade de campo (θ_{CC}), ou θ no Ψ de -100 hPa (REICHARDT, 1988); no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), ou θ no Ψ de -15000 hPa (SAVAGE et al., 1996); na resistência à penetração (θ_{RP}) de 2,00 MPa (TAYLOR et al., 1966); e no θ em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 0,10 $m^3\ m^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968). Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} serão obtidos nos potenciais de -10 e -15000 hPa, utilizando-se a CRA (Eq. 1) ajustada aos dados experimentais. Os valores de θ em que RP atinge 2,00 MPa foi obtido por meio da Eq. 2. Esse valor foi adotado em razão de diversos autores considerarem RP > 2,00 MPa como condição restritiva ao crescimento dos sistemas radiculares para culturas anuais e pomares de citros (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; ARAÚJO et al., 2004; BLAINSKI, et al., 2008). O valor de θ em que a porosidade de aeração é de 0,10 $m^3\ m^{-3}$ foi obtido a partir da expressão: [(1 – Ds / Dp) - 0,1] (Eq. 3), em que Dp é a densidade das partículas ($Mg\ m^{-3}$).

O IHO foi calculado como a diferença entre os limites superior e inferior de θ, em que ocorrem os limites das propriedades físicas envolvidas. O limite superior é o menor valor de θ, considerando θ_{CC} ou θ_{PA}; e o inferior é o maior valor de θ entre θ_{PMP} e θ_{RP}. Assim, de acordo com Guimarães et al. (2013), a expressão do cálculo (Eq. 4, 5, 6 e 7) depende dos valores limites:

$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$, para $\theta_{CC} < \theta_{PA}$ e $\theta_{PMP} > \theta_{RP}$; (Eq. 4)

$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$, para $\theta_{CC} < \theta_{PA}$ e $\theta_{PMP} < \theta_{RP}$; (Eq. 5)

$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$, para $\theta_{CC} > \theta_{PA}$ e $\theta_{PMP} > \theta_{RP}$; (Eq. 6)

$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$, para $\theta_{CC} > \theta_{PA}$ e $\theta_{PMP} < \theta_{RP}$. (Eq. 7)

em que:
IHO é o Intervalo Hídrico Ótimo;
θ_{CC} é o conteúdo de água na capacidade de campo;

θ_{PMP} é o conteúdo de água no ponto de murcha permanente;

θ_{PA} é o conteúdo de água na porosidade de aeração;

θ_{RP} é o conteúdo de água na resistência a penetração.

A densidade do solo de alerta (Ds_a) foi determinada, considerando-se o menor valor de Ds em que a água disponível passa a ser restringida pela RP e, ou, PA; a densidade do solo crítica (Ds_c) corresponde ao valor em que IHO = 0. A comparação de médias da Ds foi feita, utilizando-se o intervalo de confiança, descrito por Gabriel (1978), usando o Programa R (R CORE TEAM, 2020).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da avaliação da Ds nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m estão apresentados na Figura 8.

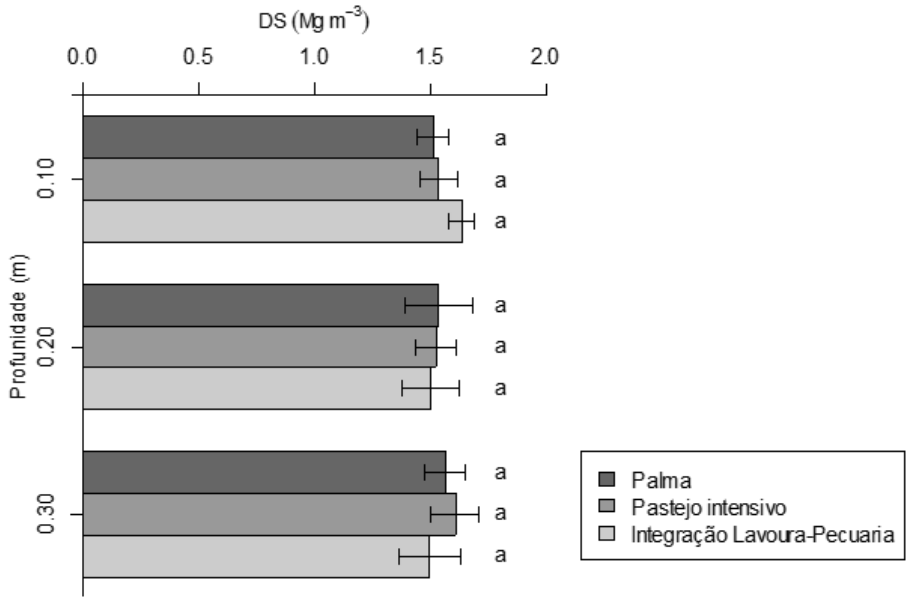

Figura 11. Valores médios de densidade do solo (Mg m^{-3}) nos diferentes sistemas de preparo para as profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Não foram constatadas diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de uso e manejo para a densidade do solo, resultado similar ao encontrado por Tian et al. (2022), que avaliaram 7 campos experimentais em 5 anos, percebendo que não houve diferença significativa entre os tratamentos a partir do segundo ano avaliado.

Mesmo possuindo revolvimento do solo em seu manejo, a área de Integração Lavoura-Pecuária (C) apresentou o maior valor de Ds na camada 0,00-0,10 m quando comparada com as demais áreas e camadas, o que pode ser explicado devido seu manejo conter pisoteio animal e tráfego de maquinário. Tian et al. (2022) observaram em sua pesquisa que na camada de 0,20–

0,30 m, os valores de Ds não foram afetados pelo manejo do solo, afirmando que os efeitos do manejo sobre a qualidade física se concentram principalmente na camada de 0,00–0,20 m.

Os parâmetros ajustados estão dispostos na Tabela 2. Identificou-se através dos modelos ajustados que, sob mesmas condições de umidade e densidade, a resistência do solo à penetração é maior na área de Integração Lavoura-Pecuária.

Tabela 2. Equações da curva de retenção de água no solo e resistência do solo à penetração

Área	Função	Equação	R^2
Palma (A)	CRA	$\theta = \exp(-1{,}5020 + 0{,}3044\ Ds)\ \Psi^{-0{,}0667}$	0,78
	CRS	$RP = 0{,}2550\ \theta^{-0{,}6453}\ Ds^{2{,}4512}$	0,81
Pastejo intensivo (B)	CRA	$\theta = \exp(-1{,}6019 + 0{,}3344\ DS)\ \Psi^{-0{,}0698}$	0,87
	CRS	$RP = 0{,}0407\ \theta^{-0{,}8723}\ Ds^{6{,}0272}$	0,77
Integração Lavoura-pecuária (C)	CRA	$\theta = \exp(-1{,}5018 + 0{,}4192\ Ds)\ \Psi^{-0{,}0489}$	0,82
	CRS	$RP = 0{,}0658\ \theta^{-1{,}3115}\ Ds^{3{,}4193}$	0,81

Resistência do solo à penetração (RP) em MPa; Densidade do solo (Ds) em Mg m^{-3}; Conteúdo de água no solo (θ) em $m^3\ m^{-3}$; Potencial matricial (Ψ) em hPa; Curva de Retenção de Água no solo (CRA); Curva de Resistência do Solo à penetração (CRS)

As funções de CRA e CRS descritas na tabela 2 foram utilizadas para estimar os teores de água (θ) na capacidade de campo (θ_{CC}), no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e na resistência crítica do solo à penetração (θ_{RP}), os quais, juntamente com θ, em que a porosidade com ar é de 10 % (θ_{PA}), são apresentados na Figura 12.

O Intervalo Hídrico Ótimo dos três usos e manejos avaliados está representado pela área hachurada, em que conteúdos de água acima ou abaixo desta, representam condições limitantes ao desenvolvimento vegetal, ou seja, a água se encontra com disponibilidade restrita. Apesar de diferentes valores críticos de RP serem reportados na literatura, foi considerado o valor de RP = 2,00 MPa, por ser o mais frequentemente utilizado como crítico para o crescimento das plantas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; BERTIOLI JÚNIOR et al., 2012).

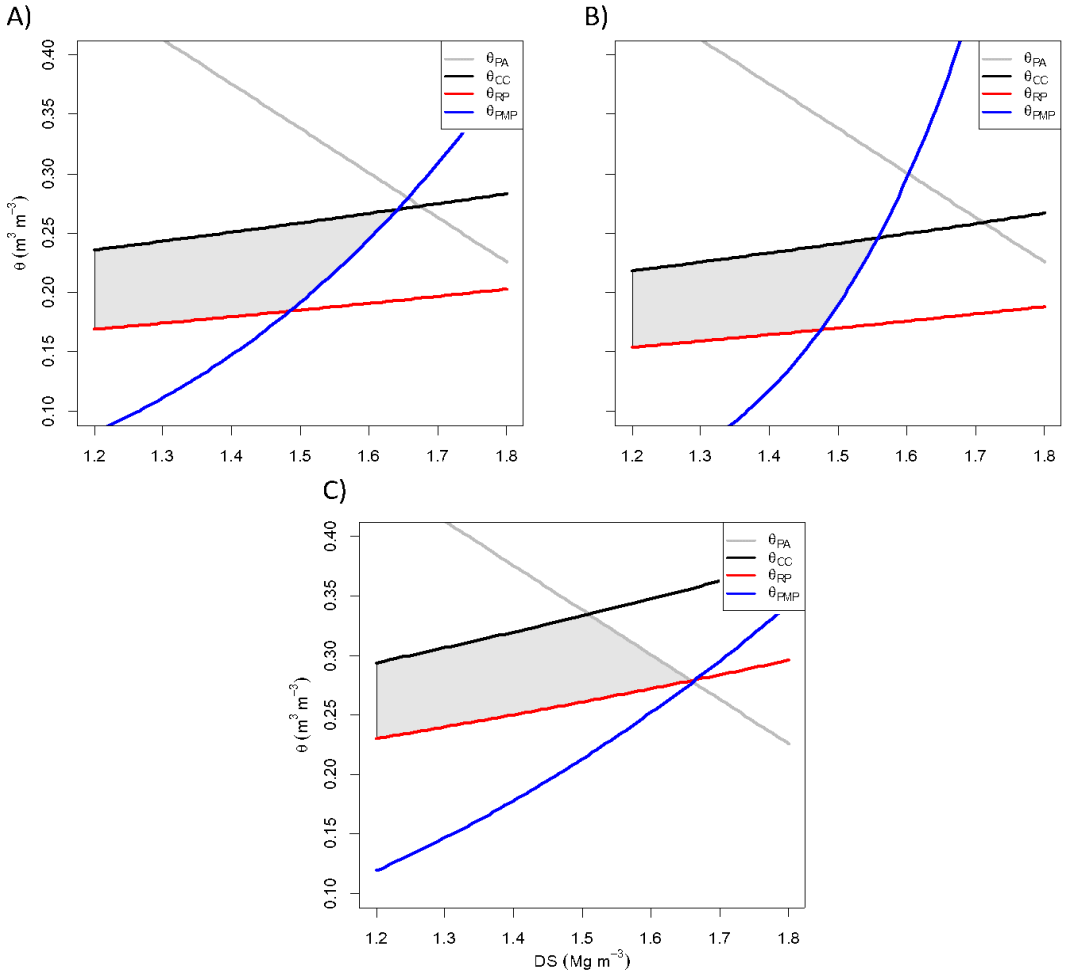

Figura 12. Conteúdo de água do solo em função da densidade nos níveis críticos da Capacidade de Campo (ψ = - 100 hPa), Ponto de Murcha Permanente (ψ = - 15000 hPa), Porosidade de Aeração crítica de 10% e Resistência à Penetração de 2,00 MPa, em função da densidade de um Planossolo nas áreas cultivadas com Palma (A); Pastejo intensivo (B); Integração lavoura-pecuária (C).

Densidade do Solo (Ds); Capacidade de Campo (θ_{CC}); Ponto de Murcha Permanente (θ_{PMP}); Porosidade de Aeração (θ_{PA}); Resistência à Penetração (θ_{RP}).

Observa-se que os solos ocupados por cultivo de Palma miúda (A) e por Pastejo intensivo (B) possuem variações similares. Ambos apresentaram aumento do conteúdo de água disponível entre θ_{CC} e θ_{PMP} de acordo com a Ds, o que é indicado pelo sinal positivo da Ds na função de retenção ajustada aos dados (Tabela 1). Além disso, nestes dois solos a θ_{PA} não assumiu valores críticos ($\leq$ 10%) nem menores que θ_{CC}, sugerindo que a aeração não é a condição física limitante para o crescimento vegetal (TORMENA et al. 1999; BERTIOLI JÚNIOR et al. 2012). O mesmo movimento entre Ds, θ_{RP} e θ_{PA} foi identificado por Araújo et al. (2004), que avaliou os Intervalos Hídricos Ótimos de uma área de mata nativa e uma área de cultivo com preparo de solo.

O solo sob pastejo intensivo (B), que possui tendência à compactação das camadas mais superficiais devido o pisoteio animal (TIAN et al. 2022), apresentou valores de RP menores na camada 0,00-0,10 m quando comparados com as camadas seguintes da mesma área, que foram os maiores se comparados inclusive com as respectivas camadas das demais áreas. Esta variação pode ser explicada pela presença de forrageira do gênero *Brachiaria* no local e a típica propagação por meio de estolhos. De acordo com os dados obtidos por Anghinoni *et al.* (2019), a incorporação de forrageiras deste gênero pode aumentar a qualidade física do solo. Silva et al. (2015) também observaram um efeito positivo desta forrageira sobre a qualidade física do solo e relataram um maior IHO na camada superficial do solo.

Como consequência da RP elevada nas demais camadas, o solo da área sob pastejo intensivo (B) apresentou uma baixa amplitude no IHO, o que, de acordo com Araújo et al. (2004) e Tormena et al. (2017), caracteriza a perda da qualidade física do solo e aumenta a probabilidade de exposição das culturas à condições restritas e de estresse físico.

Por outro lado, o solo ocupado por Integração Lavoura-Pecuária (C) apresentou redução da difusão do oxigênio no solo partir da Ds = 1,50 Mg m^{-3} causada pela redução da θ_{PA} que atingiu valores críticos (≤ 10%). A redução da θ_{PA} devido ao aumento da Ds também foi observada por Bertioli Júnior et al. (2012) e Tormena et al. (2017), que verificaram que a θ_{PA} é frequentemente identificada como um fator limitante do IHO e, consequentemente do crescimento do sistema radicular. Além disso, os autores afirmam que áreas manejadas com maquinário tendem a apresentar uma menor bioporosidade efetiva, o que influencia diretamente na água armazenada no solo e, consequentemente, na qualidade física do solo.

De maneira geral, para os solos das três áreas analisadas, a progressão da Ds promoveu simultaneamente a redução na θ_{PA} e o aumento na θ_{RP}, de forma que este último atuou como limite inferior de todos os valores de Ds, o que torna a resistência do solo à penetração a variável mais limitante e relevante para a qualidade física destes solos.

Analogamente, conforme decresce a Ds, há o aumento do IHO até o ponto onde a θ_{RP} substitui a θ_{PMP}, nos solos das áreas A e B, e até a θ_{PA} substituir a θ_{CC}, no solo da área C. Estes comportamentos foram semelhantes obtidos por Betioli Júnior et al. (2012); Araújo et al. (2013); Pereira (2014); Pellin (2017); Suaréz (2018).

Neste contexto, a densidade crítica do solo (Ds_c) foi definida pela interseção da θ_{CC} e θ_{PMP} para os solos nas áreas A e B, e pela interseção da θ_{PA} e θ_{RP} no solo da área C, sendo estes os pontos limitantes do IHO nestes solos.

A relação funcional entre o Intervalo Hídrico Ótimo e a densidade do solo (Ds) é apresentada na figura 13 onde identificou-se que o indicador está positivamente relacionado com a densidade do solo até valores de Ds = 1,48 Mg m^{-3}, Ds = 1,47 Mg m^{-3} e Ds = 1,51 Mg m^{-3} para os solos das áreas A, B e C, respectivamente, com RP crítica de 2,00 MPa, passando a ser negativamente relacionado quando os valores são superiores aos mencionados.

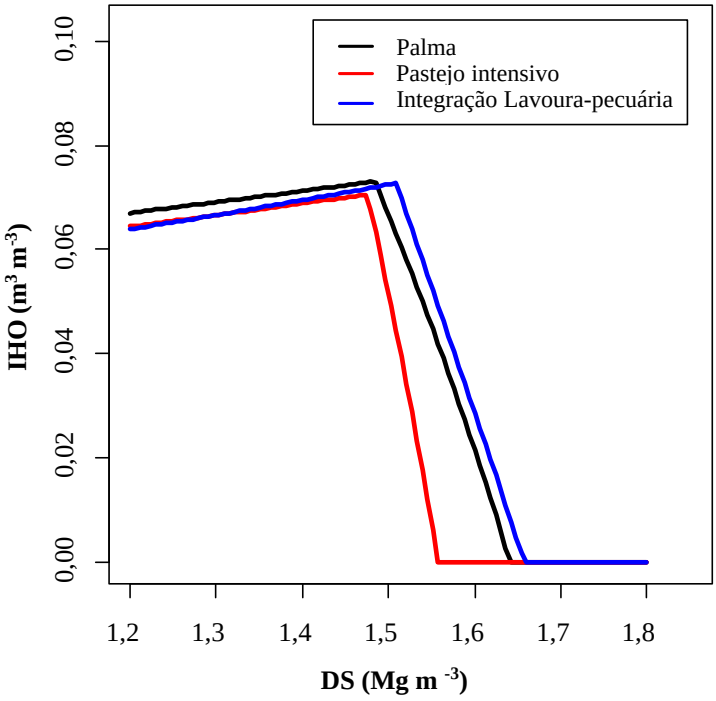

Figura 13. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) sob diferentes limites críticos de Densidade do Solo (Ds).

Apesar de serem utilizados e manejados de maneiras distintas, os três solos apresentaram uma relação entre IHO e Ds semelhantes. O comportamento do solo ocupado pela Integração Lavoura-Pecuária (C) está similar ao encontrado por Tavanti et al. (2019) em sistema similar de integração, onde a densidade aparente variou de 1,45 a 1,51 Mg m^{-3} na camada 0,00-0,10 m e 1,52 a 1,60 Mg m^{-3} na camada de 0,10-0,20 m. Além disso, Tormena et al. (2017) observaram que embora não haja estudos locais direcionados à ação do maquinário sobre o solo, é reconhecido que as operações mecanizadas impõem estresse adicional e força de compactação nos solos agrícolas, portanto, um plano de manejo criterioso e específico precisa ser estabelecido para evitar a degradação do solo e redução de sua qualidade física.

Os valores encontrados nas áreas A, B e C de teores de carbono e matéria orgânica estão dispostos na Tabela 3. Observa-se que a matéria orgânica não foi afetada pelo uso e manejo

admitido nas áreas avaliadas. Os valores estão de acordo com os encontrados por Garcia e Rosolem (2010) e Bertioli Júnior et al. (2012), que identificaram cerca de 3% de matéria orgânica em seus experimentos.

Tabela 3. Teor de carbono e matéria orgânica do Planossolo das 3 áreas experimentais, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade

Tratamento	Camada (m)	MO (%)	MO (g . kg $^{-1}$)	CO (g . kg $^{-1}$)
Palma (A)	0,00-0,10	2,81	28,13	16,35
	0,10-0,20	2,35	23,55	13,69
	0,20-0,30	2,50	25,06	14,57
Pastejo intensivo (B)	0,00-0,10	2,53	25,33	14,72
	0,10-0,20	2,64	26,41	15,35
	0,20-0,30	2,44	24,40	14,19
Integração Lavoura-pecuária (C)	0,00-0,10	3,40	34,00	19,77
	0,10-0,20	2,75	27,53	16,01
	0,20-0,30	2,69	26,91	15,65

Percentual de matéria orgânica (MO %); Matéria orgânica (MO g . kg $^{-1}$); Carbono Orgânico (CO).

Os valores de equilibrados Ds identificados nas três áreas, apesar do uso intensivo na área B e de maquinário na área C, pode ser justificado pelo teor de matéria orgânica nestes, uma vez que a quantidade de carbono orgânico (CO) tem influência nos fatores orgânicos de ligação, que por sua vez desempenham papel importante na agregação e estabilidade do solo (TISDALL; OADES, 1982; SILVA et al., 2020a; LYNCH et al., 2021). Além disso, segundo Garcia e Rosolem (2010), os compostos orgânicos apresentam densidade inferior aos constituintes minerais do solo, contribuindo para a diminuição da densidade do solo através do incremento de carbono orgânico no solo.

CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um índice efetivo de qualidade física do solo para quantificar os efeitos combinados de práticas de uso e manejo.

Os solos avaliados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas para os valores de densidade do solo (Ds), entretanto, esta variável influenciou na qualidade do solo e no comportamento do IHO na área de Integração Lavoura-Pecuária, uma vez que apenas o solo desta área apresentou uma camada com valor de 1.63 g/cm³ e apenas este solo teve sua densidade do solo crítica (D_{Sc}) limitada pela interseção na umidade na porosidade de aeração e na umidade de resistência a penetração.

A resistência do solo à penetração (RP) atuou como um fator limitante ao IHO em todas as áreas avaliadas, mesmo nos solos em que a Ds não se apresentou como fator prejudicial à RP demandando maiores cuidados quanto à compactação do solo.

Apesar da intensividade no uso e manejo, a área sob pastejo intensivo foi favorecida pela presença de forrageira do gênero *Brachiaria* que são capazes de auxiliar na melhoria da Ds devido a propagação via estolhos e a atuação do sistema radicular da cultura. Ainda assim, este solo apresentou maior RP nas camadas mais profundas e a menor amplitude de IHO, requerendo maior atenção quanto à compactação do solo caso seu uso seja direcionado a algum cultivo futuramente.

A área com cultivo de Palma apresentou um comportamento atípico e não evidenciado em outras pesquisas que tratam de IHO, uma vez que sua RP foi maior apenas na camada intermediária (0,10-0,20 m). Tal compactação pode ter surgido no início do cultivo, onde é necessária a aração do solo numa profundidade de 0,15 a 0,20 m para a imersão da raquete-semente, com vistas a evitar o tombamento das plantas após o crescimento. Diante disso, sugere-se que essa ocorrência seja objeto de estudos futuros para uma maior compreensão do IHO no cultivo de forrageiras para alimentação animal, especialmente as cactáceas.

RECOMENDAÇÕES

- Verificar outros limites críticos de RP para caracterizar mais fielmente a perda da qualidade física do solo com o aumento da compactação.
- Avaliar os potenciais impactos do uso de maquinário agrícola na qualidade física do solo em camadas mais profundas, especialmente porque cargas deste tipo geralmente aumentam e transferem as forças de compressão para camadas mais profundas que as apresentadas nesta pesquisa.
- Sugere-se avaliar o IHO não apenas para entender qual o manejo mais adequado para o solo, mas considerar também a comparação do indicador em áreas com finalidades distintas, vista a incipiência de trabalhos na avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo de áreas com diferentes usos.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L. J. O. Degradação do solo e desertificação no Nordeste do Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 25, p. 23-25, 2000.

ACTON, D. F.; GREGORICH, L. J. The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada. p. 138, 1995.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. **Densidade do solo**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). Manual de Métodos de Análise do Solo. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

ÁLVARO-FUENTES, J.; ARRÚE, J. L.; GRACIA, R.; LÓPEZ, M. V. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. **Geoderma**, [S.L.], v. 145, n. 3-4, p. 390-396, jun. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.04.005.

ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 191-196, ago. 2003. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662003000200001.

ANGHINONI, G.; TORMENA, C. A.; LAL, R.; ZANCANARO, L.; KAPPES, C. Enhancing soil physical quality and cotton yields through diversification of agricultural practices in central Brazil. **Land Degradation & Development**, [S.L.], v. 30, n. 7, p. 788-798, 17 fev. 2019. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3267.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R.; BURGOS, N.; MARQUES, F. A. Solos da caatinga. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Pedologia - Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 227-260.

ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.48, n.6, p. 651-660, 2013.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 337-345, abr. 2004. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832004000200012.

BAI, Z.; CASPARI, T.; GONZALEZ, M. R.; BATJES, N. H.; MÄDER, P.; BÜNEMANN, E. K.; GOEDE, R.; BRUSSAARD, L.; XU, M.; FERREIRA, C. S. S.; REINTAM, E.; FAN, H.; MIHELIC, R.; GLAVAN, M.; TÓTH, Z. Effects of agricultural management practices on soil quality: a review of long-term experiments for europe and china. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 265, p. 1-7, out. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, Á. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [*s. l*], v. 36, p. 971-982, fev. 2012.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num nitossolo vermelho distroférrico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 273-281, abr. 2009. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000200005.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 975-983, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000300007.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 79-87, fev. 2012. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000100009.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical methods. Madison: ACSESS, 1986. Cap. 1. p. 363-375.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W. VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 120, p. 105-125, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

BURGREVER, J. C.; FREITAS, F. F.; FISTAROL, T. A. F.; ARAÚJO, F. B.; SEBEN JÚNIOR, G. F. Propriedades físicas indicadoras da qualidade do solo sob sistemas de manejo - alta floresta. **Revista Científica Rural**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 93-104, 2 ago. 2019. EDIURCAMP. http://dx.doi.org/10.30945/rcr-v21i2.361.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions Of The Asae**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 0519-0524, 1990. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). http://dx.doi.org/10.13031/2013.31360.

CARVALHO, C. B. M. **Caracterização de componentes herbáceos e arbóreos e desempenho de bovinos em sistemas silvipastoris, no Agreste de Pernambuco**. 2021. 91 f. Tese (Doutorado) - Curso de Zootecnia, Departamento de Zootecnia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 933-942, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000300003.

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water retention and storage. In: DANE, J.H.; TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis**: physical methods. Madison: ACSESS, 2002. Cap. 4. p. 671-720.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. **Geoderma**, [S.L.], v. 120, n. 3-4, p. 201-214, jun. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G.; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. **Análise Granulométrica**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). Manual de Métodos de Análise do Solo. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (ed.). **Defining Soil Quality for a Sustainable**. 35. ed. [S.L.]: Sssa Special Publications, 1994. Cap. 1. p. 01-21. Online ISBN:9780891189305. DOI:10.2136/sssaspecpub35.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA (2022). **ZAPE - Cartas de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Pernambuco na escala 1:100.000** [digital]. Escala 1:100.000. Consultado em 27 de agosto de 2022, Infraestrutura de dados espaciais da Embrapa - GEOINFO. Endereço: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/2673/metadata_read

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO STAT - Livestock Primary. Roma, Italy, 2019. Disponível em: . Acesso em: 28 mar. 2019.

FEDDEMA, J. J. Estimated impacts of soil degradation on the African water balance and climate. **Climate Research**, [S.L.], v. 10, p. 127-141, 1998. Inter-Research Science Center. http://dx.doi.org/10.3354/cr010127.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono Orgânico. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). Manual de Métodos de Análise do Solo. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências**, Marília, v. 26, n. 2, p. 08-25, jul. 2017. Semestral.

FU, Y.; TIAN, Z.; AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 193, p. 114-121, out. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016.

FUENTES-LLANILLO, R.; GUIMARÃES, M. F.; TAVARES FILHO, J. Morfologia e propriedades físicas de solo segundo sistemas de manejo em culturas anuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 524-530, jun. 2013.

GABRIEL, K. R. A Simple Method of Multiple Comparisons of Means. **Journal Of The American Statistical Association**, [S.L.], v. 73, n. 364, p. 724-729, dez. 1978. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1978.10480084.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 45, n. 12, p. 1489-1498, dez. 2010. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2010001200021.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of Bulk Density, Aggregate Size, and Soil Water Suction on Oxygen Diffusion, Redox Potentials, and Elongation of Corn Roots. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 180-186, mar. 1968. Wiley. http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 66, n. 4, p. 499-505, ago. 2009. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162009000400011.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 37, n. 6, p. 1512-1521, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000600008.

HUBERT, F.; HALLAIRE, V.; SARDINI, P.; CANER, L.; HEDDADJ, D. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, [S.L.], v. 142, n. 1-2, p. 226-236, nov. 2007. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.017.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 79, n. 1, p. 9-16, jun. 2000. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(99)00145-0.

JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; BURGOS, N.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do estado de Pernambuco**.

Recife, PE: SUDENE; Brasília, DF: Ministério da Agricultura; Rio de Janeiro, RJ: Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. v. 1, 359 p.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 1131-1140, out. 2007. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000500028.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. **Advances In Soil Science**, [S.L.], p. 277-294, 1985. Springer New York. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3_8.

LIMA, A. M. I.; ARAÚJO, C. M.; BARBOSA, S. R. Avaliação das propriedades físicas do solo em sistemas silvipastoris, região centro norte, estado do Piauí. **Agropecuária Cientifica no Semiárido**, v.9, n.1, p.117-124, 2013. Disponível em: DOI: http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v9i1.252.

LIMA, C. L. R.; DUPONT, P. B.; PILLON, C. N.; MIOLA, E. C. C. Least limiting water range, S-index and compressibility of a Udalf under different management systems. **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 77, n. 1, p. 01-08, fev. 2020. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0224.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, C. F.; GASPARINI, A. S.; NUNES; C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011.

LOVELAND, T. R.; SOHL, T.; SAYLER, K.; GALLANT, A.; DWYER, J.; VOLGELMANN, J.; ZYLSTRA, G. **Land cover trends:** rates, causes, and consequences of late-twentieth century U. S. land cover change. Sioux Falls: EPA, 1999. 38 p.

LYNCH, J. P.; MOONEY, S. J.; STROCK, C. F.; SCHNEIDER, H. M.. Future roots for future soils. **Plant, Cell & Environment**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 620-636, 29 nov. 2021. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/pce.14213.

MOURA, M. S.; SILVA, B. M.; MOTA, P. K.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; ACUÑA-GUZMAN, S. F.; ARAÚJO, G. S. S.; SILVA, L. C. M.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 243, p. 106523, jan. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106523.

NERY, A. R.; RODRIGUES, L. N.; SOUSA, A. G.; SANTOS, F. F. C.; NERE, D. E. R. Infiltração da água nos solos cultivados com palma forrageira e pastagem no IFCE campus Crato. **Revista Acta Kariri-Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 2, n. 1, 2020.

NEVES, L. V. M. W. **Pedogênese e diversidade microbiana em planossolos sob processo de desertificação na região semiárida de Pernambuco**. 2018. 181 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 88, n. 2, p. 161-168, fev. 2002. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(01)00253-5.

OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P. Influência dos processos de recuperação do solo após mineração de carvão sobre a mesofauna edáfica em Lauro Müller, Santa Catarina, Brasil. **Biotemas**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 69, 18 fev. 2014. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). http://dx.doi.org/10.5007/2175-7925.2014v27n2p69.

OMUTO, C. T. Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 128, n. 4, p. 199-211, dez. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.06.006.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 1777-1786, out. 2011. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000500032.

PARAHYBA, R. B. V.; SANTOS, M. C.; ROLIM NETO, F. C. Evolução quantitativa de planossolos do agreste do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 991-999, ago. 2009. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000400023.

PARAHYBA, R. B. V.; SANTOS, M. C.; ROLIM NETO, F. C.; JACOMINE, P. K. T. Pedogênese de planossolos em topossequência do agreste pernambucano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 34, n. 6, p. 1991-2000, dez. 2010. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000600023.

PELLIN, D. M. P. **Níveis de palhiço e qualidade físico-hídrica de um latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar**. 2017. 72f. Tese (Doutorado em agronomia – Produção vegetal) - Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD, Dourados.

PEREIRA, A. H. F. **Atributos físicos do solo sob tipos de transbordos em colheita mecanizada de cana crua. 2014.** 54f. Dissertação (Mestrado em agronomia – Produção vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD, Dourados.

PEREIRA, M. L. T.; SOARES, M. P. A.; SILVA, E. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SOUZA, W. M. Variabilidade climática no Agreste de Pernambuco e os desastres decorrentes dos extremos climáticos. **Journal Of Environmental Analysis and Progress**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 394-402, 15 ago. 2017. Journal of Environmental Analysis and Progress - JEAP. http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1452.394-402.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Versão 4.0.3 R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. http://www.gammadesign.com

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.

REIS FILHO, R.J.C. **Pecuária de Leite na Região Nordeste – 2013, um ano de seca severa, mas de grande aprendizado.** Revista Indústria de Laticínios, São Paulo Brasil, p. 34 – 37. Nov/2013.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; TAN, C. S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, [S.L.], v. 146, n. 3-4, p. 466-474, ago. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 52, n. 1, p. 49-58, mar. 2001. Wiley. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00357.x.

RODRIGUES, T. R.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Water availability to soybean crop as a function of the least limiting water range and evapotranspiration. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S.L.], v. 47, n. 2, p. 161-167, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v4743746.

SANTOS, A. D.; FONSECA, D. M.; SOUSA, B. M. L.; SANTOS, M. E. R.; CARVALHO, A. N. Pasture structure and production of supplemented cattle in deferred signalgrass pasture. **Ciência Animal Brasileira**, [S.L.], v. 21, p. e-43578, 2020. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/1809-6891v21e-43578.

SANTOS, A. M. G.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.; APOLINÁRIO, V. X. O.; COSTA, S. B. M.; COÊLHO, D. L.; PEIXÔTO, T. V. F. R.; SANTOS, E. R. S. Animal performance in grass monoculture or silvopastures using tree legumes. **Agroforestry Systems**, [S.L.], v. 94, n. 2, p. 615-626, 23 jul. 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10457-019-00431-2.

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; BLAND, W. L.; DUGAS, W. A. Lower Limit of Soil Water Availability. **Agronomy Journal**, [S.L.], v. 88, n. 4, p. 644-651, jul. 1996. Wiley. http://dx.doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040024x.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 58, n. 6, p. 1775, 1994. Wiley. http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, É. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as

affected by soil management. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 154, p. 103-113, dez. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013.

SILVA, J. E.; BARBOSA, S. B. P.; ABREU, B. DA S.; SANTORO, K. R.; SILVA, E. C.; BATISTA, Â. M. V.; MARTINEZ, R. L. V. Effect of somatic cell count on milk yield and milk components in Holstein cows in a semi-arid climate in Brazil. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 391-402, out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1519-99402018000400004.

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020a. Brazilian Journal of Development. http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n7-431.

SILVA, T. A. C.; MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; RAMOS, P. P.; PEREIRA, J. M. Avaliação da qualidade de solo de área de lixão desativado: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 630, 7 abr. 2020b. Revista Brasileira de Geografia Fisica. http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p630-640.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 79, n. 1, p. 7-31, set. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008.

SOUZA, A. R.; ALBUQUERQUE, S. F.; LOPES, G. M. B.; SILVA, A. B.; NUNES FILHO, J. Caracterização e interpretação de um planossolo háplico eutrófico do Agreste Pernambucano, Brasil. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, Recife, v. 10, n. 1, p. 271-279, jun. 2013.

STUMPF, L.; PINTO, M. A. B.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; DUTRA JUNIOR, L. A. Recuperação de solos degradados por mineração de carvão: indicadores de qualidade e espécies vegetais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 3, p. 210-217, 2016.

TAVANTI, R. F. R.; FREDDI, O. S.; MARCHIORO, V.; TAVANTI, T. R.; GALINDO, F. S.; WRUCK, F. J.; SHIRATSUCHI, L.; BREDA, C. C. Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, [S.L.], v. 19, p. 01-10, nov. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00232.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for médium - to coarse - textured soil materials. **Soil Science**, [S.L.], v. 102, n. 1, p. 18-22, jul. 1966. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). http://dx.doi.org/10.1097/00010694-196607000-00002.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 577 p.

TIAN, M.; QIN, S.; WHALLEY, W. R.; ZHOU, H.; REN, T.; GAO, W. Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density, penetrometer resistance, water retention curve, least limiting water range and X-ray computed tomography. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 221, p. 105420, jul. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2022.105420.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 141-163, jun. 1982. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x.

TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L.; LOGSDON, S.; CHERUBIN, M. R. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 166, p. 122-130, mar. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.09.015.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 573-581, dez. 1998. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000400002.

TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; ARAÚJO, M. A.; PINTRO, J. C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 65-71, abr. 2004. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662004000100010.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications In Soil Science and Plant Analysis**, [S.L.], v. 19, n. 13, p. 1467-1476, out. 1988. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Soil Research**, [S.L.], v. 38, n. 5, p. 947, 2000. CSIRO Publishing. http://dx.doi.org/10.1071/sr99108.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. **Densidade de partículas**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). Manual de Métodos de Análise do Solo. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.