v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DE UM ARGISSOLO AMARELO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO MARANHENSE

PHYSICAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A YELLOW ARGISOL (ULTISOL) UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE MARANHÃO CERRADO

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DE UN ARGISOL AMARILLO BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EN EL CERRADO DE MARANHÃO

Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego[1], Karolline Rosa Cutrim Silva[1], Wilian Vieira da Silva[1], Eduardo Carvalho da Silva Neto[2], Brainerd Gomes dos Santos[1], Robson de Almeida Souza[1], Romério Rodrigues dos Santos[1]

e798907
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.8907

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

A expansão agrícola sobre solos do Cerrado tem intensificado a degradação física, tornando essencial compreender como diferentes manejos afetam sua qualidade estrutural e hídrica. Este estudo objetivou avaliar os efeitos do Cerrado nativo (CN), da pastagem perene (PP) e da integração lavoura-pecuária (ILP) sobre os atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo. O estudo foi conduzido na Fazenda Barbosa, Brejo (MA), nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, avaliando-se agregação, atributos físicos e a curva de retenção de água, com dados submetidos à ACP e à ANOVA/Tukey. A ACP explicou 76,14% e 75,50% da variância total dos atributos, evidenciando associação negativa do ILP ao eixo estrutural (CP1), com maior proporção de microagregados nesse sistema. Na camada superficial, o ILP apresentou capacidade de campo 30% maior que a do CN e CAD e APD 72% e 56% superiores às da PP, respectivamente. O CN manteve a melhor estabilidade estrutural, com predomínio de macroagregados e menor resistência à penetração, porém menor disponibilidade hídrica. A PP apresentou os indicadores mais limitantes, com CAD e APD inferiores na camada superficial e índice S 33% menor que o do CN na subsuperfície (S = 0,04), sugerindo compactação associada ao pisoteio animal. O ILP favorece a disponibilidade hídrica, ainda que demande atenção à estabilidade dos agregados, enquanto o CN preserva a estrutura física do solo e a PP compromete a qualidade físico-hídrica, reforçando a importância do manejo conservacionista para os solos do Cerrado maranhense.

PALAVRAS-CHAVE: Agregação do solo. Integração lavoura-pecuária. Manejo sustentável. Qualidade do solo. Retenção de água.

ABSTRACT

Agricultural expansion on Cerrado soils has intensified physical degradation, making it essential to understand how different management systems affect their structural and hydraulic quality. This study aimed to evaluate the effects of native Cerrado (NC), permanent pasture (PP), and integrated crop-livestock system (ICL) on the physical-hydraulic attributes of a Yellow Argisol (Ultisol). The study was conducted at Fazenda Barbosa, Brejo (MA), in the 0.00–0.05 m and 0.05–0.10 m layers, evaluating aggregation, physical attributes, and the soil water retention curve, with data submitted to PCA and ANOVA/Tukey.

[1]Centro de Ciências de Chapadinha, Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Chapadinha, MA, Brasil.
[2]Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

PCA explained 76.14% and 75.50% of the total variance in the attributes, showing a negative association of ICL with the structural axis (PC1), with a higher proportion of microaggregates in this system. In the surface layer, ICL showed field capacity 30% higher than NC and available water capacity (AWC) and readily available water (RAW) 72% and 56% higher than PP, respectively. NC maintained the best structural stability, with a predominance of macroaggregates and lower penetration resistance, but lower water availability. PP showed the most limiting indicators, with lower AWC and RAW in the surface layer and an S index 33% lower than NC in the subsurface layer (S = 0.04), suggesting compaction associated with animal trampling. ICL favors water availability, although it requires attention to aggregate stability, while NC preserves the soil's physical structure and PP compromises physical-hydraulic quality, reinforcing the importance of conservation management for soils in the Maranhão Cerrado.

KEYWORDS: *Soil aggregation. Crop-livestock integration. Sustainable management. Soil quality. Water retention.*

RESUMEN
La expansión agrícola sobre suelos del Cerrado ha intensificado la degradación física, haciendo esencial comprender cómo diferentes manejos afectan su calidad estructural e hídrica. Este estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos del Cerrado nativo (CN), la pastura perenne (PP) y la integración agricultura-ganadería (IAG) sobre los atributos físico-hídricos de un Argisol Amarillo. El estudio se realizó en la Fazenda Barbosa, Brejo (MA), en las capas de 0,00-0,05 m y 0,05-0,10 m, evaluándose la agregación, los atributos físicos y la curva de retención de agua, con datos sometidos a PCA y ANOVA/Tukey. El PCA explicó el 76,14% y el 75,50% de la varianza total de los atributos, evidenciando una asociación negativa de la IAG con el eje estructural (PC1), con mayor proporción de microagregados en ese sistema. En la capa superficial, la IAG presentó capacidad de campo 30% mayor que el CN y CAD y APD 72% y 56% superiores a la PP, respectivamente. El CN mantuvo la mejor estabilidad estructural, con predominio de macroagregados y menor resistencia a la penetración, pero menor disponibilidad hídrica. La PP presentó los indicadores más limitantes, con CAD y APD inferiores en la capa superficial y un índice S 33% menor que el del CN en la subsuperficie (S = 0,04), lo que sugiere compactación asociada al pisoteo animal. La IAG favorece la disponibilidad hídrica, aunque requiere atención a la estabilidad de los agregados, mientras que el CN preserva la estructura física del suelo y la PP compromete la calidad físico-hídrica, reforzando la importancia del manejo conservacionista para los suelos del Cerrado maranhense.

PALABRAS CLAVE*: Agregación del suelo. Integración agricultura-ganadería. Manejo sostenible. Calidad del suelo. Retención de agua.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como um dos principais exportadores de commodities agrícolas, impulsionado pela expansão da agricultura no bioma Cerrado (Rada, 2013; Sousa *et al.*, 2021; Winkler *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2024). Essa intensificação, no entanto, tem favorecido o desmatamento e a degradação do solo, sobretudo pelo preparo intensivo, que compromete a agregação, a porosidade e a movimentação de água e ar no perfil, com reflexos negativos sobre a disponibilidade de água e nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e a atividade microbiana (Parihar *et al.*, 2020; Winkler *et al.*, 2021; Mondal; Chakraborty, 2022; Pinto *et al.*, 2022; Pessoa *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2025). No Cerrado, os solos de textura arenosa são

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

particularmente vulneráveis a essa degradação estrutural, apresentando baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, rápida decomposição da MOS e elevadas perdas por lixiviação, o que compromete a fertilidade natural e aumenta o risco de contaminação dos lençóis freáticos (Salviano *et al.*, 2017; Huang; Hartemink, 2020; Medeiros *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2025).

Nesse contexto, práticas conservacionistas como o plantio direto, a diversificação de culturas e a manutenção da cobertura vegetal são fundamentais para a sustentabilidade agrícola sobre solos arenosos, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a formação e estabilização de agregados e a capacidade de retenção hídrica (Bonetti *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2023; Locatelli *et al.*, 2025; Ghosh *et al.*, 2025). Entre essas alternativas, destacam-se os sistemas integrados de produção, como a Integração Lavoura-Pecuária (ILP), que contribuem para a redução da pegada ambiental da agropecuária e para a melhoria da saúde do solo (Oliveira *et al.*, 2024). Em contrapartida, o manejo convencional intensificado tende a comprometer a qualidade física do solo, provocando compactação, desagregação e baixa incorporação de matéria orgânica (Souza *et al.*, 2024). Barbosa *et al.* (2024), por exemplo, relataram redução de 23-33% na biomassa radicular da cana-de-açúcar sob remoção contínua da palhada, com impactos negativos sobre o carbono e a estrutura do solo.

A degradação estrutural do solo é um processo multifatorial, o que reforça a necessidade de indicadores físicos sensíveis para avaliar sua qualidade (Guo *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2024). A densidade aparente, a porosidade total, a resistência à penetração e a capacidade de retenção de água estão entre os atributos mais utilizados, influenciando diretamente a infiltração, a aeração e a disponibilidade de nutrientes às plantas, sendo valores de resistência à penetração superiores a 2,0 MPa considerados limitantes ao crescimento radicular (Richart *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2007; Blainski *et al.*, 2008; Costa, 2016; Ramos, 2017; Barbosa *et al.*, 2022; Michelon *et al.*, 2023). A estabilidade dos agregados constitui outro atributo determinante, refletindo a coesão entre partículas minerais e materiais orgânicos e estando diretamente relacionada à retenção e infiltração de água, à porosidade e à resistência à compactação e à erosão (Tisdall; Oades, 1982; Kemper; Rosenau, 1986; Silva; Mielniczuk, 1997; Six; Paustian, 2014; Cheng *et al.*, 2015; Yudina; Kuzyakov, 2019; Lavelle *et al.*, 2020; Pinto *et al.*, 2022; Lima; Kaiser, 2023; Andrade *et al.*, 2025).

A curva de retenção de água no solo (CRAS) permite inferir a disponibilidade hídrica às plantas, sendo o modelo de Van Genuchten (1980) o mais utilizado para seu ajuste, do qual derivam parâmetros como a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e o índice S de Dexter (2004), sensível à estrutura física do solo, com valores acima de 0,035, ou 0,045, segundo o ajuste proposto por Andrade e Stone (2009) para solos do Cerrado, indicativos de boa

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

qualidade estrutural, e valores inferiores a 0,020 característicos de solos degradados (Dexter, 2004; Qi *et al.*, 2018; Amorim *et al.*, 2022; Farooq *et al.*, 2024). Em solos do Cerrado, a forma da CRAS é fortemente influenciada pela textura e pela mineralogia, com sistemas conservacionistas tendendo a favorecer maior macroporosidade e maior água disponível, ao passo que áreas sob manejo convencional ou pastagens degradadas exibem elevação da microporosidade e redução dessa disponibilidade (Amorim *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2022; Kaiser; Silva, 2023).

Compreender as interações entre os atributos físico-hídricos e as práticas de manejo adotadas é indispensável para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis. Partiu-se da hipótese de que sistemas conservacionistas, com menor revolvimento do solo, apresentariam melhor qualidade físico-hídrica de forma geral em relação à pastagem sob pisoteio animal, mas que a relação entre estabilidade estrutural e disponibilidade de água poderia não ser necessariamente convergente entre os manejos. Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar comparativamente os efeitos de três sistemas de manejo, Cerrado nativo, pastagem perene e integração lavoura-pecuária, sobre os atributos estruturais e hidráulicos de um Argissolo Amarelo Distrocoeso no Cerrado maranhense.

2. METODOLOGIA

Descrição do local de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Barbosa, situada no município de Brejo, Mesorregião leste do Maranhão, Microrregião de Chapadinha, Maranhão, Brasil (latitude 3°42'1.68"S, longitude 42°56'25.15"O e altitude de 100 metros). De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima do tipo Aw, tropical quente e úmido, com estação seca no inverno, precipitação média anual entre 1600 e 1900 mm e temperatura média anual superior a 26 °C (Alvares *et al.*, 2014).

O solo da fazenda é classificado como Argissolo Amarelo Distrocoeso plintossólico, textura arenosa/média/argilosa, A moderado, epiálico, caulinítico, Tmb, hipoférrico, fase cerrado tropical subcaducifólio, relevo plano (Oliveira *et al.*, 2020). Originário de sedimentos arenoargilosos, pertencente à Formação Barreiras, do período Plio-Pleistoceno (Sousa *et al.*, 2012).

A vegetação predominante é caracterizada como Cerrado tropical subcaducifólio, exibindo uma diversidade florística e uma variedade de formas, incluindo campo cerrado, cerrado ralo, cerrado típico e cerrado denso (IBGE, 2012; Dantas *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2020). As

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

espécies mais comuns são Araticum, Sucupira Preta, Murici, Pequi, Faveira, Ipê e Ipê Amarelo. As Palmáceas presentes no município são: Carnaúba, Buriti e Babaçu (Correia Filho, 2011).

Seleção, avaliação e histórico das áreas de estudo

A Fazenda Barbosa destaca-se por sua abordagem inovadora no uso da terra. Em contraste com os métodos convencionais da região, adota práticas agrícolas diversificadas e voltadas para a conservação ambiental. Dessa forma, para a execução deste estudo foram demarcadas três áreas de interesse: Cerrado nativo (CN), Pastagem perene (PP) e lavoura em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP). A seguir, apresentam-se a caracterização química e granulométrica das áreas de estudo (Tabela 1) e um breve histórico e descrição das áreas selecionadas:

Tabela 1. Caracterização dos atributos químicos e granulométricos da camada arável (0,00-0,10 m) das áreas de estudo localizadas na Fazenda Barbosa, Brejo – MA

Análise Química								
Área	pH	P (meh)	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+Al	MO
	($CaCl_2$)	mg dm^{-3}	$cmol_c$ dm^{-3}					g dm-3
ILP	5,21	40,95	0,08	2,28	0,92	0,00	2,30	25,53
CN	4,65	2,68	0,05	1,26	0,61	0,25	2,70	24,14
PP	4,80	18,42	0,05	1,38	0,68	0,23	2,90	23,11

Análise Granulométrica						
Área	Areia Total	Areia Fina	Areia Grossa	Argila	Silte	Classificação textural
	%					
ILP	73,16	38,71	34,45	19,83	7,01	Franco argiloso arenoso
CN	82,51	39,53	42,98	14,47	3,02	Franco arenoso
PP	80,78	39,83	40,94	17,65	1,57	Franco arenoso

Nota: ILP: Integração lavoura-pecuária; CN: Cerrado nativo; PP: Pastagem perene; MO: Matéria orgânica. P e K – Extrator Mehlich^{-1}; Al, Ca e Mg – Extrator KCl 1 mol L^{-1}; H+Al – pH SMP (7,5).

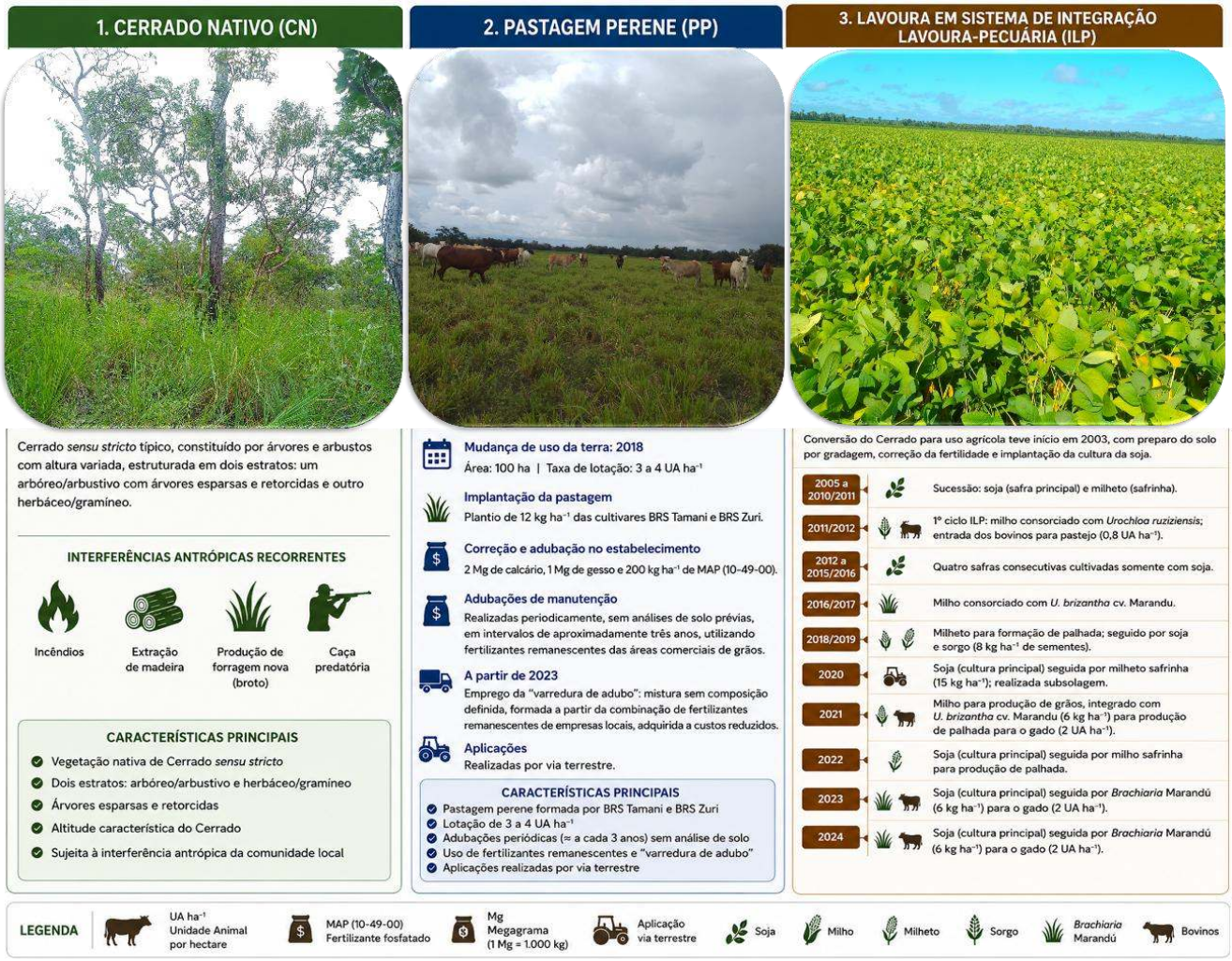
Cerrado Nativo (CN): Vegetação típica do Cerrado sensu stricto com árvores e arbustos distribuídos em dois estratos (arbóreo/arbustivo e herbáceo/gramíneo) (Figura 1). A área sofre interferências antrópicas como incêndios, extração de madeira, produção de brotos para forragem e caça.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Pastagem Perene (PP): Área de 100 ha convertida do Cerrado em 2018 para pastagem, com lotação de 3 a 4 UA/ha. Plantio das cultivares BRS Tamani e BRS Zuri, com correção do solo por calcário, gesso e adubação fosfatada inicial. Adubações periódicas a cada três anos e desde 2023 aplicação de varredura de adubo.

Integração Lavoura-Pecuária (ILP): Conversão iniciada em 2003 com preparo do solo e plantio de soja, seguida de cultivo alternado de soja, milho, milheto e braquiária, integrados com produção pecuária (0,8 a 2 UA/ha). Correção e adubação do solo são constantes, com aplicações específicas para cada cultura e safra. O sistema mantém rotações e cobertura com braquiária para produção de palhada e manejo sustentável do solo.

Figura 1. Esquema visual simplificado dos manejos e breve histórico



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Coleta das amostras

Em cada sistema de manejo (CN, PP e ILP) foram coletados 21 pontos distribuídos em uma malha amostral de 100 m × 100 m. Em cada ponto foram abertas trincheiras com dimensões de 0,25 × 0,20 × 0,10 m (largura x comprimento x altura). Nessas trincheiras, realizou-se a coleta de amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m. Após a coleta, as amostras foram cuidadosamente acondicionadas em embalagens devidamente identificadas e transportadas até o laboratório de Física e Classificação do Solo da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha. As amostras passaram pelo processo de secagem ao ar, para posteriormente serem analisadas.

Determinação da estabilidade dos agregados

As amostras de solo indeformadas foram fragmentadas para a obtenção de agregados com diferentes tamanhos, os quais passaram por um conjunto de peneiras com malhas de 8 e 4,0 mm. Dos agregados retidos na peneira de 4,0 mm, pesaram-se 50 g, que foram submetidos a análises de estabilidade dos agregados via úmida.

A estabilidade de agregados via úmida foi obtida distribuindo-se as amostras pesadas na parte superior de um conjunto de peneiras com abertura de 2,00 – 1,00 – 0,50 – 0,25 – 0,15 mm, mais o fundo de peneira. As amostras foram previamente umedecidas até o ponto de friabilidade e acopladas ao agitador com oscilação vertical para o peneiramento em água durante 15 min, a 42 oscilações por minuto (Salton *et al.*, 2017). Posteriormente, o material retido foi cuidadosamente retirado, acondicionado em latas, seco em estufa a 105 °C durante 24 h e pesado para a determinação da massa seca retida em cada peneira.

De posse dos resultados, determinou-se o diâmetro médio ponderado (DMP) (Kiehl, 1979), diâmetro médio geométrico (DMG) (Kemper; Rosenau, 1986), porcentagem de agregados estáveis na classe >2 mm (Sales *et al.*, 2016) e a porcentagem de macroagregados (MACRO) e de microagregados (MICRO), somando-se a porcentagem de agregados retidos nas classes acima e abaixo de 250 µm, respectivamente (Tisdall; Oades, 1982).

Determinação dos atributos físicos do solo

Para a determinação dos atributos físicos do solo nas áreas de estudo (CN, PP e ILP) coletaram-se amostras indeformadas aleatoriamente pelo método do anel volumétrico nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, totalizando 126 unidades. A partir dessas amostras efetuaram-se as seguintes análises: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt),

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e umidade gravimétrica (Ug), conforme a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

Realizou-se in situ a medição da resistência do solo à penetração (RPS) com auxílio de um penetrógrafo eletrônico modelo penetroLOG-Falker-PLG1020 a cada 0,05 m até chegar à profundidade de 0,10 m. A medição foi feita ao lado dos locais de retirada dos anéis volumétricos.

Determinação da curva de retenção de água no solo

A partir de parte das amostras indeformadas coletadas pelo método do anel volumétrico nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m determinou-se a curva de retenção de água no solo. Para tal, as amostras foram preparadas seguindo-se a metodologia descrita por Teixeira e Bhering (2017).

O potencial (ou tensão) de 0 kPa foi obtido pela pesagem das amostras após a saturação por capilaridade. Os potenciais de 6, 10, 30 e 60 kPa foram determinados em mesa de tensão de areia-caulim e as tensões de 100, 300, 500 e 1500 kPa em câmara de Richards (Teixeira; Bhering, 2017). Após atingir o equilíbrio, as amostras foram pesadas em balança de precisão, secas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante e pesadas novamente para obtenção da umidade correspondente a cada tensão aplicada.

De posse dos resultados, inicialmente determinou-se a capacidade de campo (CC), que corresponde à umidade no potencial de 10 kPa; ponto de murcha permanente (PMP), relacionada à umidade no potencial de 1500 kPa; água facilmente disponível (AFDr), obtida pela subtração da umidade no potencial de 0 kPa pela CC, multiplicada pela espessura da camada do solo desejada; capacidade de água disponível (CAD), obtida pela subtração entre CC-PMP, multiplicada pela camada de solo desejada; e água prontamente disponível (APD), que corresponde à subtração da umidade no potencial de 6 kPa pela umidade no potencial de 100 kPa (Barbosa *et al.*, 2014).

A curva de retenção de água no solo foi ajustada conforme o modelo de Van Genuchten (1980), utilizando-se o software Excel, seguindo-se a equação descrita abaixo:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + (\alpha\Psi_m)^n]^m}$$

Onde, θ: conteúdo volumétrico de água no solo (m3 m-3); θ_r: umidade residual do solo (m3 m-3); θ_s: umidade volumétrica do solo na saturação (m3 m-3); Ψ_m: valor absoluto do potencial matricial (kPa); α, n, m: parâmetros empíricos do modelo, sendo α expresso em kPa^{-1} e n, m adimensionais.

Nesse modelo, θs define a assíntota superior da curva, representando o conteúdo saturado de água no solo, enquanto θr define a assíntota inferior da curva, representando o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

conteúdo residual de água no solo; o parâmetro n é adimensional e reflete a forma da curva, ao tempo em que o α é expresso em kPa^{-1} e é afetado pela escala da tensão da água no solo e m é a restrição de Mualem: m = 1 - (1/n). Os parâmetros θr, n e α foram obtidos por meio da rotina Solver da planilha eletrônica Excel, ao passo que o parâmetro θs foi determinado por meio da pesagem direta da amostra do solo saturado.

O índice S foi determinado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, de acordo com Dexter (2004), e restrição de Mualem (1976) que corresponde a: 1 - (1/n). Segue abaixo a equação utilizada:

$$|S| = -n(\theta_s - \theta_r)\left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)}$$

Onde, $|S|$: valor de inclinação da curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão em módulo; n: parâmetro adimensional empírico do modelo; θs: umidade volumétrica do solo na saturação ($m^3\ m^{-3}$); θr: umidade residual do solo ($m^3\ m^{-3}$); m: restrição proposta por Mualem (1976).

Análise estatística

Os dados referentes à estabilidade de agregados e aos atributos físicos das diferentes áreas foram submetidos à análise multivariada de Componentes Principais, utilizando-se a distância euclidiana como medida de similaridade, com o auxílio do software R, versão 4.0 (R Core Team, 2021). Para a curva de retenção de água no solo e os parâmetros obtidos por meio da equação ajustada, foi determinado o coeficiente de correlação, visando avaliar o grau de ajuste do modelo aos dados experimentais. Já os parâmetros físico-hídricos derivados da curva de retenção (CC, PMP, AFDr, CAD e APD) foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o mesmo software R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

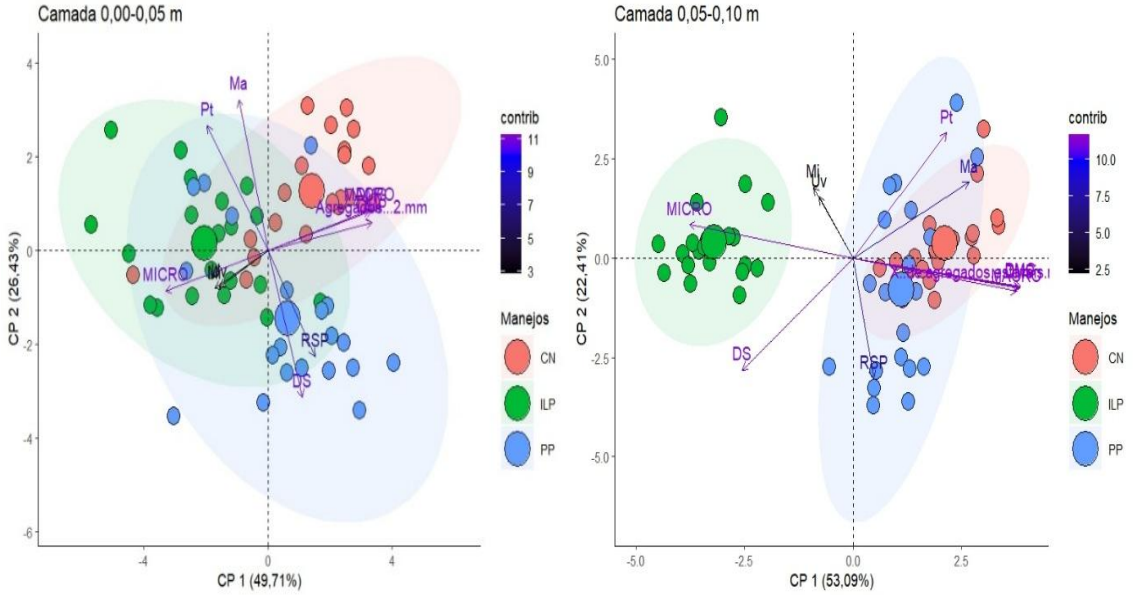
Atributos físicos e agregados do solo

Os dois primeiros componentes principais (CPs) explicaram 76,14% e 75,50% da variância total dos atributos físicos e estruturais do solo nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, respectivamente, indicando que a maior parte da variabilidade dos dados está bem representada (Figura 2). O primeiro componente principal (CP1) explicou 49,71% da variância

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

na camada de 0,00-0,05 m e 53,09% na de 0,05-0,10 m, enquanto o segundo componente (CP2) respondeu por 26,43% e 22,41%, respectivamente.

Figura 2. Representação biplot CP1 × CP2 sobre as variáveis físicas e agregados em diferentes manejos no Cerrado maranhense



Na camada de 0,00-0,05 m, o CP1 apresentou correlação muito forte com os principais atributos estruturais do solo, como o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP, r = 0,95), a fração de agregados maiores que 2 mm (r = 0,95), o diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG, r = 0,94), os macroagregados (MACRO, r = 0,92) e, inversamente, com os microagregados (MICRO, r = -0,92). Isso indica que o CP1 está associado principalmente à qualidade estrutural do solo, refletindo o desenvolvimento de agregados estáveis e maior porosidade funcional. O segundo componente principal (CP2) mostrou correlações fortes a muito fortes com a porosidade total (Pt, r = 0,75), a densidade do solo (Ds, r = -0,88) e a macroporosidade (Ma, r = 0,91), indicando que esse componente está relacionado às propriedades físicas do solo que afetam sua capacidade de armazenamento e movimentação de água e ar.

Na camada de 0,05-0,10 m, observou-se um padrão semelhante ao da camada superior: o CP1 manteve correlações muito fortes com o diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG, r = 0,97), o diâmetro médio ponderado (DMP, r = 0,96), a fração de agregados > 2 mm (r = 0,96),

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

os macroagregados (r = 0,94) e os microagregados (r = -0,94), reforçando sua forte associação com a estrutura do solo. Além disso, o CP1 apresentou correlações significativas com a porosidade total (Pt, r = 0,79), a densidade do solo (Ds, r = -0,71) e a resistência do solo à penetração (RPS, r = -0,76). Esses resultados indicam que solos com melhor estrutura tendem a apresentar maior porosidade, menor densidade e menor resistência à penetração, condições que favorecem o crescimento radicular e a circulação de água e ar no perfil. De acordo com Pessoa *et al.* (2024), a qualidade estrutural do solo influencia diretamente diversos processos edáficos, como as trocas gasosas, a infiltração de água, o transporte de solutos, a retenção de umidade e a disponibilidade de água para as plantas.

A análise gráfica por meio do biplot da ACP revelou relações claras entre os atributos físicos e estruturais do solo. As variáveis Macro, DMP, DMG e a fração de agregados com diâmetro superior a 2 mm apresentaram ângulos agudos entre si, indicando forte correlação positiva. Em contrapartida, essas mesmas variáveis formaram ângulos obtusos com MICRO e Mi, padrão que se manteve consistente em ambas as camadas avaliadas.

De forma semelhante, observaram-se ângulos agudos entre os vetores de Pt e Ma, assim como entre Mi e Uv, e entre DS e RPS, evidenciando correlações positivas entre esses pares na camada de 0,00-0,05 m. A variável RPS apresentou ângulos obtusos em relação a Pt e Ma na camada de 0,00-0,05 m e em relação a Mi e Uv na camada de 0,05-0,10 m, indicando correlações negativas nessas associações. Por sua vez, Ds formou ângulo obtuso com Pt e Ma na camada de 0,05-0,10 m.

Observou-se uma correlação inversa entre RPS e os atributos DMP, DMG e a fração de agregados maiores que 2 mm, reforçando a interpretação de que solos com maior resistência à penetração tendem a apresentar menor qualidade estrutural, refletida na menor formação de agregados estáveis e na redução do volume de porosidade funcional.

Ao analisar a distribuição dos sistemas de uso do solo no plano formado pelas componentes principais, observa-se que, na camada de 0,00-0,05 m, o sistema ILP foi associado negativamente ao CP1, enquanto os sistemas CN e PP apresentaram associação positiva. Considerando que o CP1 está fortemente relacionado aos atributos estruturais do solo, essa distinção indica que o sistema ILP apresenta menor desenvolvimento estrutural em comparação aos sistemas CN e PP. Já na segunda componente principal (CP2), que reflete propriedades físicas como porosidade e densidade, tanto os sistemas CN quanto ILP exibiram forte associação positiva, ao passo que o sistema PP mostrou uma influência negativa.

Na camada de 0,05-0,10 m, os padrões de influência dos sistemas de manejo sobre CP1 e CP2 foram semelhantes aos observados na camada superficial, com alterações pontuais nas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

variáveis que mais contribuíram para cada componente, sugerindo que as diferenças estruturais e físicas entre os sistemas permanecem, embora com intensidade variável em profundidades maiores.

Ao analisar a estrutura do solo, verificou-se que a área ILP apresentou uma predominância de microagregados em comparação às demais áreas, o que exerceu forte influência na separação entre os ambientes analisados. Além disso, o ILP apresentou menores valores nas variáveis associadas ao eixo CP1. Vale destacar que, de modo geral, os macroagregados são mais transitórios e mais suscetíveis à degradação, especialmente em função do preparo do solo, enquanto os microagregados tendem a ser mais estáveis (Mondal; Chakraborty, 2022).

Corroborando os resultados deste estudo, Pessoa *et al.* (2024) observaram que áreas com alta concentração de microagregados (< 0,25 mm) apresentaram redução no diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. Esse comportamento pode estar relacionado ao elevado teor de argila dispersível, frequentemente encontrado em solos coesivos, o que compromete a estabilidade dos agregados e aumenta a suscetibilidade a processos erosivos. A presença de argila dispersível favorece a obstrução da porosidade do solo por meio de sua eluviação ao longo do perfil, o que reduz as taxas de infiltração de água (Pessoa *et al.*, 2024; Mota *et al.*, 2018).

A distribuição dos sistemas de manejo no espaço formado pelos dois primeiros componentes principais sugere a atuação de dois processos de degradação física distintos e parcialmente independentes. O primeiro eixo (CP1), fortemente associado à agregação do solo (DMP, DMG, macroagregados), separou o ILP dos demais sistemas, refletindo o efeito do revolvimento mecânico periódico associado ao cultivo sobre a fragmentação dos macroagregados. Já o segundo eixo (CP2), relacionado à densidade e à porosidade do solo, separou a PP dos sistemas CN e ILP, evidenciando um processo distinto de degradação, a compactação superficial provocada pelo pisoteio animal contínuo, não diretamente associado ao preparo do solo. Essa dissociação entre os dois eixos indica que a perturbação por revolvimento mecânico, típica do ILP, e a perturbação por compactação superficial, típica da pastagem, afetam a estrutura do solo por vias distintas, com consequências igualmente distintas sobre o comportamento hídrico do solo, conforme discutido a seguir.

Curva de retenção e Parâmetros físico-hídricos do solo

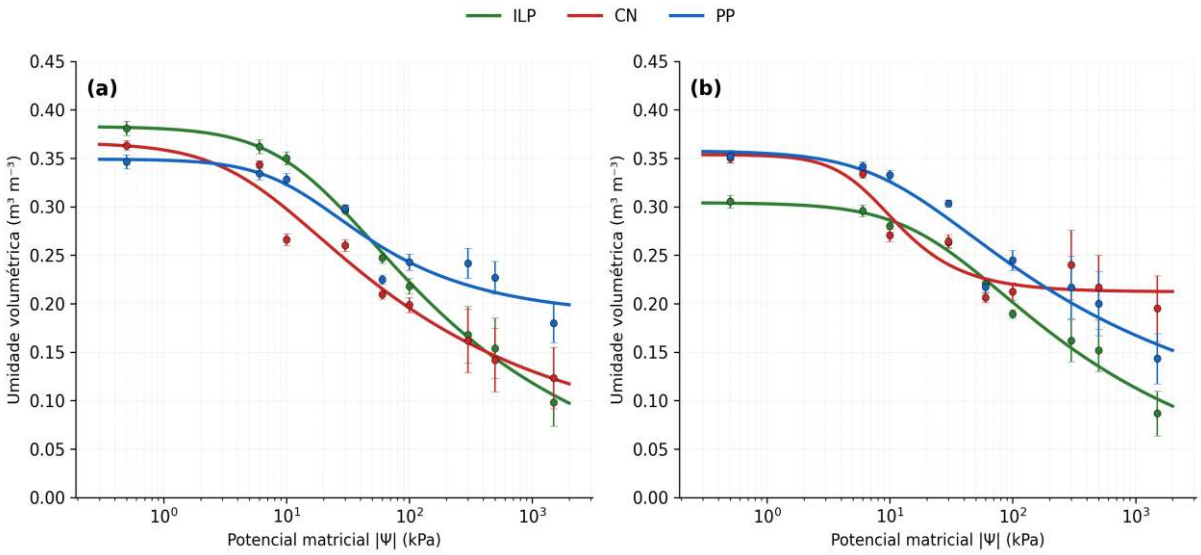
Em relação à curva de retenção de água no solo na camada de 0,00-0,05 m, na condição de saturação (0 kPa), o sistema ILP apresentou o maior teor de água, seguido pelo CN e pela

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

PP (Figura 3), padrão corroborado pelos valores de θs obtidos na modelagem da curva de retenção (Tabela 2) e que indica maior porosidade total no solo sob ILP.

Esse resultado é, à primeira vista, contrastante com a menor estabilidade estrutural dos agregados observada para o ILP na análise de Componentes Principais. Contudo, essa aparente contradição ilustra uma distinção importante entre estabilidade estrutural dos agregados e porosidade total do solo: o revolvimento periódico associado ao cultivo tende a fragmentar macroagregados, reduzindo sua estabilidade frente a forças físicas, mas, simultaneamente, cria e conecta poros de diferentes tamanhos, elevando a porosidade total e a capacidade de armazenamento de água no solo, ainda que às custas da resiliência estrutural desses agregados frente a estresses futuros, como o impacto de gotas de chuva ou novos ciclos de preparo (Mondal; Chakraborty, 2022; Guo *et al.*, 2020). Assim, os dois atributos, estabilidade de agregados e retenção hídrica, embora frequentemente associados na literatura, respondem a mecanismos distintos e podem divergir sob manejo com revolvimento do solo.

Figura 3. Curva de retenção hídrica do solo em diferentes manejos e profundidades (0,00-0,05 m (a) e 0,05-0,10 m (b)) sob múltiplas tensões matriciais



Com o aumento da tensão matricial, observou-se uma redução mais acentuada no teor de água nos sistemas CN e PP, sugerindo maior proporção de microporos instáveis e menor capacidade de retenção. Na tensão correspondente à capacidade de campo (10 kPa), o CN apresentou queda mais abrupta no teor de água, enquanto ILP e PP mantiveram valores mais

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

elevados (Tabela 3), indicando maior capacidade de retenção de água disponível no solo sob ILP. Esse comportamento é característico de solos com maior proporção de microporos de menor diâmetro, associados a maior tensão de retenção capilar, conforme descrito por Kaiser e Silva (2023) e Ribeiro *et al.* (2007) para solos de textura e mineralogia semelhantes.

Em tensões intermediárias (100 - 500 kPa), o teor de água na PP superou o do ILP, o que pode estar associado à maior proporção de microporos formados por compactação superficial, estruturas que retêm água com maior força, porém com baixa disponibilidade para as plantas. Esse padrão é compatível com o relatado por Michelon *et al.* (2023) e Richart *et al.* (2005) para solos sob pisoteio animal, nos quais a compactação superficial reduz a macroporosidade e favorece a formação de microporos que retêm água com maior energia, limitando sua disponibilidade às plantas.

Na tensão de 1500 kPa, que corresponde ao ponto de murcha permanente, a PP apresentou o maior teor de água retida, seguida pelo CN, enquanto o ILP registrou o menor valor (Tabela 3). Esse comportamento evidencia que o solo sob ILP disponibiliza maior fração de água às plantas, em virtude da menor retenção em microporos de difícil extração, corroborando o proposto por Barbosa *et al.* (2022), segundo o qual sistemas conservacionistas com menor revolvimento tendem a apresentar menor retenção de água em microporos de difícil extração, ampliando a fração hídrica efetivamente disponível às plantas.

Na camada de 0,05-0,10 m, a PP apresentou o maior teor de água na saturação, seguida de perto pelo CN, enquanto o ILP registrou o menor valor (Tabela 2), possivelmente devido à redistribuição vertical da estrutura do solo. Contudo, entre 10 e 60 kPa, intervalo associado à água prontamente disponível, o ILP manteve teores mais estáveis, enquanto o CN apresentou maior variabilidade e quedas mais acentuadas.

Na tensão de 1500 kPa, os teores de água retida foram novamente maiores em CN e PP, em comparação ao ILP (Tabela 3), confirmando a predominância de microporos nos sistemas CN e PP. Embora esses poros aumentem a retenção total de água, reduzem a fração efetivamente disponível para as plantas, reforçando a interpretação de Huang e Hartemink (2020) de que solos sob manejo menos conservacionista tendem a concentrar uma fração maior da água retida em poros de reduzido diâmetro, pouco acessível ao sistema radicular.

Em relação aos parâmetros estimados pelo modelo de Van Genuchten na camada de 0,00-0,05 m, o sistema ILP destacou-se pelo maior teor de água na saturação e pelo menor teor de água residual, refletindo elevada porosidade total e baixa retenção de água em microporos (Tabela 2). O menor valor de α indica menor tensão de entrada de ar, o que, associado ao maior índice S, evidencia maior presença de macroporos e boa capacidade de drenagem e aeração.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O parâmetro n, relacionado à forma da curva de retenção, sugere uma transição moderadamente abrupta entre os estados de saturação e ressecamento, condizente com solos de melhor estrutura física. O ajuste do modelo foi excelente, conferindo alta confiabilidade aos parâmetros estimados. Esses valores estão em linha com o intervalo relatado por Fouad *et al.* (2025) para solos tropicais bem estruturados, nos quais valores mais baixos de α e maiores de S indicam maior continuidade dos macroporos e melhor capacidade de drenagem.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste às curvas de retenção da água no solo em um Argissolo sob diferentes manejos no Cerrado maranhense

Manejos	θs	θr	α	n	m	r²	Índice S
	$m^3\ m^{-3}$		kPa^{-1}				
			0,00-0,05 m				
ILP	0,38	0,00	0,06	1,28	0,22	1,00	0,06
CN	0,37	0,05	0,19	1,27	0,21	0,97	0,05
PP	0,35	0,19	0,08	1,51	0,34	0,91	0,04
			0,05-0,10 m				
ILP	0,30	0,00	0,04	1,26	0,21	0,98	0,05
CN	0,35	0,21	0,14	2,09	0,52	0,90	0,06
PP	0,36	0,06	0,09	1,23	0,19	0,94	0,04

O Cerrado Nativo (CN) apresentou valores intermediários de θs e θr, com α mais elevado e n semelhante ao do ILP (Tabela 2), o que indica uma maior proporção de mesoporos e uma transição um pouco mais rápida entre as fases de saturação e drenagem em comparação ao ILP. O índice S indica uma estrutura física ainda adequada. Esse padrão é condizente com o descrito por Ramos (2017) para Argissolos do Nordeste brasileiro, em que a maior heterogeneidade textural se reflete em valores intermediários dos parâmetros da curva de retenção.

Na PP, apesar de apresentar uma capacidade de armazenamento de água máxima semelhante ao CN e próxima à do ILP, observou-se um valor elevado de água residual, indicando maior presença de microporos (Tabela 2). O valor baixo de α aliado ao menor índice S sugere menor continuidade dos macroporos, refletindo uma estrutura do solo mais compactada e com sinais de degradação. Além disso, o maior valor de n indica uma transição mais abrupta na retenção de água, característica comum em solos compactados ou com alteração estrutural superficial. Essa maior retenção em microporos e a menor conectividade dos poros grandes

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

apontam para compactação superficial do solo, o que pode comprometer a drenagem e a aeração, impactando negativamente o desenvolvimento das raízes. Esse conjunto de indicadores é consistente com o descrito por Richart *et al.* (2005) e Blainski *et al.* (2008), segundo os quais a compactação por pisoteio animal reduz a continuidade dos macroporos e eleva a proporção de microporos de retenção, comprometendo a qualidade física do solo.

Na camada de 0,05-0,10 m, o ILP manteve os melhores indicadores de qualidade física, com θr praticamente nulo e valores de α e n condizentes com boa distribuição de poros e transição adequada entre saturação e secagem; o índice S reforça essa condição (Tabela 2). No CN, o maior valor de θr, associado a α e n mais elevados, indica maior retenção de água em microporos e estrutura mais heterogênea, o que se reflete no menor ajuste do modelo. O sistema PP novamente apresentou os piores indicadores na camada subsuperficial, com o menor índice S e o menor ajuste do modelo em relação ao ILP, indicando maior dispersão dos dados e acentuada degradação estrutural. Esses resultados reforçam o papel do ILP na manutenção da qualidade físico-hídrica em profundidade, em concordância com Oliveira *et al.* (2024), enquanto o menor ajuste do modelo para o CN é compatível com a maior heterogeneidade estrutural relatada por Silveira *et al.* (2023) para solos sob vegetação nativa no Cerrado.

Os resultados obtidos para o índice S reforçam sua sensibilidade como indicador da qualidade física do solo. Conforme os critérios de Dexter (2004), valores de S superiores a 0,035, ou 0,045, segundo o ajuste proposto por Andrade e Stone (2009) para solos do Cerrado, indicam uma estrutura adequada, enquanto valores inferiores a 0,020 caracterizam solos com estrutura degradada. Nesse contexto, o sistema ILP demonstrou maior eficiência na conservação da qualidade física, sobretudo na camada superficial, enquanto a pastagem perene, com índice S sistematicamente inferior a 0,045 em ambas as camadas, apresentou os indicadores mais compatíveis com solos estruturalmente degradados.

Na camada superficial (0,00-0,05 m), o ILP apresentou a maior capacidade de campo, estatisticamente superior à da PP e à do CN, que também diferiram entre si (Tabela 3). O ponto de murcha permanente não diferiu estatisticamente entre os manejos nessa camada, indicando que a maior retenção nominal de água não disponível na PP não foi confirmada estatisticamente. Já a PP apresentou o menor desempenho em termos de água efetivamente disponível às plantas, com os menores valores de capacidade de água disponível (CAD) e água prontamente disponível (APD), estatisticamente inferiores aos dos demais manejos. O CN, por sua vez, apresentou a menor capacidade de campo e o maior valor de água facilmente disponível (AFDr), estatisticamente superior ao dos demais manejos, o que pode refletir uma estrutura relativamente estável: esse valor elevado decorre da baixa CC combinada a um teor de saturação próximo ao

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dos demais manejos, já que a diferença entre θ0 e CC é maior nesse sistema, indicando drenagem gravitacional mais rápida e uma transição mais acentuada entre a saturação e a capacidade de campo, condizente com uma estrutura porosa bem desenvolvida, ainda que isso não implique necessariamente maior água disponível às plantas no intervalo de tensão relevante para a absorção radicular. Esse padrão é consistente com o descrito por Richart *et al.* (2005) e Silveira *et al.* (2023), segundo os quais a compactação por pisoteio contínuo, associada à ausência de práticas conservacionistas, reduz a macroporosidade funcional e compromete a disponibilidade hídrica em pastagens manejadas de forma inadequada. O desempenho do ILP nessa camada pode ser atribuído à maior diversidade de cobertura vegetal, à maior densidade radicular e à ciclagem de matéria orgânica típicas de sistemas integrados, fatores que, segundo Ghosh *et al.* (2025) e Oliveira *et al.* (2024), favorecem a formação de macroporos funcionais e a melhoria da estrutura do solo.

Tabela 3. Parâmetros físico-hídricos do solo: Capacidade de Campo (CC), Ponto de Murcha Permanente (PMP), água facilmente disponível (AFDr), capacidade de água disponível (CAD) e água prontamente disponível (APD) sob diferentes manejos e profundidades no Cerrado maranhense

Manejos	CC	PMP	AFDr	CAD	APD
	$m^3\ m^{-3}$		mm		$m^3\ m^{-3}$
	0,00-0,05 m				
ILP	0,35±0,0067 a	0,10±0,0246 a	1,55±0,138 b	12,5±1,17 a	0,14±0,0115 a
CN	0,27±0,0059 c	0,12±0,0318 a	4,86±0,401 a	8,25±1,19 a	0,14±0,0086 a
PP	0,33±0,0061 b	0,18±0,0203 a	0,91±0,136 b	7,25±1,42 b	0,09±0,0106 b
	0,05-0,10 m				
ILP	0,28±0,0064 b	0,09±0,0230 b	1,36±0,101 b	9,25±1,67 a	0,11± 0,0058 a
CN	0,27± 0,0064 b	0,20±0,0339 a	4,00±0,434 a	4,50±1,18 a	0,12±0,0140 a
PP	0,33±0,0049 a	0,14±0,0259 a	0,95±0,133 b	9,83±1,67 a	0,10±0,0105 a

Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na camada subsuperficial (0,05-0,10 m), houve redução generalizada nos valores de capacidade de campo nos sistemas ILP e CN, estatisticamente inferiores ao da PP, como esperado devido à menor atividade biológica e à compactação natural em profundidade (Tabela 3). O ILP apresentou o menor ponto de murcha permanente, estatisticamente inferior aos do CN e da PP, reforçando a capacidade do manejo integrado em disponibilizar maior fração de água

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ao longo do perfil. O CN manteve a maior água facilmente disponível da camada, estatisticamente superior à do ILP e da PP, o que pode refletir presença de microporos ativos ou influência da textura mais argilosa nessa profundidade. Já a capacidade de água disponível e a água prontamente disponível não diferiram estatisticamente entre os três manejos na camada subsuperficial. Esse comportamento geral é esperado em profundidade, uma vez que a menor atividade biológica e radicular reduz a formação de macroporos, conforme discutido por Michelon *et al.* (2023) para Argissolos sob diferentes sistemas de manejo.

Em conjunto, os resultados aqui apresentados respondem ao objetivo proposto, evidenciando que os três sistemas de manejo avaliados alteraram de forma diferenciada tanto os atributos estruturais quanto os hidráulicos do Argissolo estudado. A hipótese de que sistemas conservacionistas apresentariam, de forma geral, melhor qualidade físico-hídrica em relação à pastagem sob pisoteio animal foi parcialmente confirmada: o Cerrado nativo, referência de menor perturbação antrópica, manteve a melhor estrutura de agregados, mas não a maior disponibilidade de água; e o ILP, apesar do revolvimento periódico do solo, apresentou o melhor desempenho hídrico, confirmando que estabilidade estrutural e disponibilidade de água, embora correlacionadas na maior parte da literatura consultada, respondem a mecanismos parcialmente distintos, e nem sempre convergentes, de resposta ao manejo. Já a pastagem perene, sob o histórico de manejo observado, reuniu as condições físico-hídricas menos favoráveis entre os três sistemas em praticamente todos os atributos avaliados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração lavoura-pecuária proporciona maior disponibilidade de água às plantas, associada a maior capacidade de campo e maior água disponível, ainda que apresente menor estabilidade estrutural dos agregados em razão do revolvimento periódico do solo. O Cerrado nativo preserva a maior estabilidade estrutural, com predomínio de macroagregados, mas apresenta menor disponibilidade hídrica facilmente extraível. A pastagem perene, sob o manejo observado, apresenta os indicadores físico-hídricos mais limitantes, com sinais de compactação e degradação estrutural associados ao pisoteio animal.

A estabilidade estrutural e a disponibilidade hídrica do solo respondem a mecanismos distintos de degradação, sendo necessário o monitoramento conjunto desses atributos para orientar práticas de manejo mais sustentáveis nos solos do Cerrado maranhense.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fazenda Barbosa pela disponibilização da área experimental e pelo apoio logístico à realização desta pesquisa. À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), pela concessão da bolsa de pesquisa. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAM) e à Universidade Federal do Maranhão, Campus de Chapadinha (UFMA/CCCh), pelo suporte acadêmico e institucional. Ao Grupo de Pesquisa e Extensão em Solos (GPES), pela valiosa contribuição durante as etapas de coleta de campo e realização das análises. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. J.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

AMORIM, R. S. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; COUTO, E. G.; KUNZ, M.; RODRIGUES, M. F.; SILVA, L. C. M.; REICHERT, J. M. Water retention and availability in Brazilian Cerrado (neotropical savanna) soils under agricultural use: Pedotransfer functions and decision trees. Soil and Tillage Research, v. 224, n. 10, p. 105485, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105485

ANDRADE, M. G. O.; CORDEIRO, C. F. S.; ROBERTO, A. F.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Lime and gypsum reduce N-fertilizer requirements and improve soil physics, fertility and crop yields in a double-cropped system. Geoderma, v. 453, n. 1, 117132, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117132

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003

BARBOSA, L. C.; TENELLI, S.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CASTIONI, G. A. F.; ROSSI NETO, J.; CARVALHO, J. L. N. Linking soil physical quality to shoot and root biomass production in scenarios of sugarcane straw removal. European Journal of Agronomy, v. 152, n. 1, 127029, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127029

BARBOSA, L. R.; SOUZA, H. A.; OLIVEIRA, F. P.; NUNES, L. A. P. L.; LEITE, L. F. C. Physical-hydraulic properties of an Ultisol in direct planting and free livestock integration in the Cerrado. Revista Caatinga, v. 35, n. 2, p. 460-469, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n221rc

BARBOSA, S. M.; OLIVEIRA, G. C. de; CARDUCCI, C. E.; MONTOANI SILVA, B. Potencialidade de uso de zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do Cerrado. Semina: Ciências

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Agrárias, v. 35, n. 4, p. 2357-2368, 2014. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n4Suplp2357

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, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T.; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. Soil and Tillage Research, v. 174, n. 12, p. 104-112, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008

CHENG, M.; XIANG, Y.; XUE, Z.; AN, S.; DARBOUX, F. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. Catena, v. 124, n. 12, p. 77-84, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.006

CORREIA FILHO, F. L. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea: estado do Maranhão: relatório diagnóstico do município de Brejo / Francisco Lages Correia Filho, Érico Rodrigues Gomes, Ossian Otávio Nunes, José Barbosa Lopes Filho. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011. 31 p. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15399. Acesso em: 27 jun. 2025.

COSTA, P. H. S. Resistência do solo à penetração em diferentes sistemas de uso e manejo de solo. 2016. 38f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2016.

DANTAS, J. S.; MARQUES-JÚNIOR, J.; MARTINS-FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 4, p. 1039-1050, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400001

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I. Theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. Geoderma, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004

FAROOQ, U.; AJMAL, M.; LI, S.; YANG, J.; ULLAH, S. Evaluation of Pedotransfer Functions to Estimate Soil Water Retention Curve: A Conceptual Review. Water, v. 16, n. 17, p. 2547, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/w16172547

FERNANDES, M. M. H.; SILVA, M. F.; FERRAUDO, A. S.; FERNANDES, C. Soil structure under tillage systems with and without cultivation in the off-season. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 342, n. 1, p. 108237, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108237

FOUAD, Y.; SOLTANI, I.; CUDENNEC, C.; MICHOT, D. Using near-infrared spectroscopy to estimate soil water retention curves with the van Genuchten model. Geoderma, v. 454, n. 2, 117175, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117175

GHOSH, A.; KUMAR, S.; KUSHWAHA, B. P.; LAL, R.; SINGH, A. K.; YADAV, V. K.; CHANDRA, A. Impact of short-term pasture development on soil aggregation, temperature sensitivity of soil organic carbon, and functional diversity in semi-arid ecosystem. Arid Land Research and Management, v. 39, n. 3, p. 428-454, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/15324982.2024.2448948

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

GUO, Y.; FAN, R.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; WU, D.; MCLAUGHLIN, N.; ZHANG, S.; CHEN, X.; JIA, S.; LIANG, A. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure. Science of The Total Environment, v. 703, n. 2, 134617, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134617

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. Earth-Science Reviews, v. 208, n. 9, p. 103295, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro, Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2012. 271 p.

KAISER, D. R.; SILVA, V. R. Água no solo. In: Jackson Adriano Albuquerque; Paulo Ivonir Gubiani. (Org.). Física do Solo. 1. ed. Santa Maria: Pallotti, 2023. v. 1, p. 221-276.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy, p. 425-442, 1986. DOI: https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo planta. São Paulo, Agronômica Ceres, 422 p., 1979.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; GRIMALDI, M.; JIMENEZ, J. J.; VELASQUEZ, E.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. Acta Oecologica, v. 105, n. 5, p. e103561, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561

LIMA, C. L. R.; KAISER, D. R. Estrutura e agregação do solo. In: Jackson Adriano Albuquerque; Paulo Ivonir Gubiani. (Org.). Física do Solo. 1. ed. Santa Maria: Pallotti, 2023. v. 1, p. 71-102.

LIU, C.; SI, B.; ZHAO, Y.; WU, Z.; LU, X.; CHEN, X.; HAN, X.; ZHU, Y.; ZOU, W. Drivers of soil quality and maize yield under long-term tillage and straw incorporation in Mollisols. Soil and Tillage Research, v. 246, n. 2, p. 106360, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106360

LOCATELLI, J. L.; SANTOS, R. S.; TENELLI, S.; SOARES, M. B.; GROSSO, S. D.; STEWART, C. E.; POPIN, G. V.; BERTOL, F. D.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Soil carbon allocation, composition, and sequestration changes induced by cropping diversification in tropical systems. Soil and Tillage Research, v. 248, n. 5, p. 106464, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106464

MEDEIROS, A. S.; GONZAGA, G. B. M.; SILVA, T. S.; BARRETO, B. S.; SANTOS, T. C.; MELO, P. L. A.; GOMES, T. C. A.; MAIA, S. M. F. Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. Geoderma Regional, v. 33, n. 6, p. e00647, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647

MICHELON, C. J.; KAISER, D. R.; DRESCHER, M. S.; BRAIDA, J. A. Densidade e porosidade do solo. In: Jackson Adriano Albuquerque; Paulo Ivonir Gubiani. (Org.). Física do Solo. 1. ed. Santa Maria: Pallotti, 2023. v. 1, p. 103-127.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. Geoderma, v. 405, n. 1, p. 115443, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443

MOTA, J. C. A.; MENEZES, A. S.; NASCIMENTO, C. D. V. do; ALENCAR, T. L. de; ASSIS JÚNIOR, R. N. de; TOMA, R. S.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; COOPER, M. Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil. Geoderma Regional, v. 15, n. 12, e00197, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00197

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976. DOI: https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513

OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H. M.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. Geoderma Regional, v. 37, n. 6, e00796, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796

OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; SILVA, M. B.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; MENDONCA-SANTOS, M. L.; MOURA-BUENO, J. M.; SANTIAGO, C. M. Solos da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos (RCC do Maranhão). In: Silva, M. B.; Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Oliveira, V. A. de. (Org.). Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2020. v. 1, p. 331-478.

PARIHAR, C. M.; SINGH, A. K.; JAT, S. L.; DEY, A.; NAYAK, H. S.; MANDAL, B. N.; SAHARAWAT, Y. S.; JAT, M. L.; YADAV, O. P. Soil quality and carbon sequestration under conservation agriculture with balanced nutrition in intensive cereal-based system. Soil and Tillage Research, v. 202, 104653, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104653

PESSOA, T. N.; BOVI, R. C.; NUNES, M. R.; COOPER, M.; UTEAU, D.; PETH, S.; LIBARDI, P. L. Clay mineral composition drives soil structure behavior and the associated physical properties in Brazilian Oxisols. Geoderma Regional, v. 38, n. 9, e00837, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00837

PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 46, n. 11, p. e0220074, 2022. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220074

QI, Z.; JINGFANG, S.; WENWEI, L. A survey about characteristics of soil water retention curve. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 153, n. 6, p. 062076, 2018. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/6/062076

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria: Vienna, 2021.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. Food Policy, v. 38, n. 2, p. 146-155, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.11.002

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

RAMOS, H. M. M. Funções de pedotransferência para estimativa da densidade e atributos físico-hídricos de solos do estado do Piauí. 2017. 50f. Tese (Doutorado em Agronomia - Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. Ciência e Agrotecnologia, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. Semina: Ciências Agrárias, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. Revista Ciência Agronômica, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016. DOI: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160052

SALTON, J. C.; SILVA, W. M.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 130-139.

SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; OLSZEVSKI, N.; OLIVEIRA NETO, M. B.; GIONGO, V.; QUEIROZ, A. F.; MENEZES, F. J. S. Potencialidades e limitações para o uso agrícola de solos arenosos na região semiárida da Bahia. Magistra, v. 28, n. 2, p. 137-148, 2017.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997.

SILVA, M. F.; FERNANDES, M. M. H.; FERNANDES, C.; SILVA, A. M. R.; FERRAUDO, A. S.; COELHO, A. P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. Soil and Tillage Research, v. 209, n. 5, 104924, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104924

SILVA, T. P.; NICOLAU, C. S. S.; JUNQUEIRA, C. W. R.; SANT'ANNA, G. S. L.; ZONTA, E.; SCHULTZ, N.; COELHO, I. S.; PEREIRA, M. G. Are bacterial communities and aggregation in fragile soils influenced by the management system?. Farming System, v. 3, n. 1, p. 100125, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100125

SILVEIRA, A. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; LEITE, A. M. P.; FARIA, V. L.; SANTOS, J. J. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico sob diferentes usos do solo e floresta nativa. Scientia Forestalis, v. 51, p. e3992, 2023. DOI: https://doi.org/10.18671/scifor.v51.24

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. Soil Biology and Biochemistry, v. 68, n. 1, p. A4-A9, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014

SOUSA, C. S.; KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; LOPES, E. C. S.; TEIXEIRA, S. G.; OLIVEIRA, J. K. M.; MOURA, E. M.; LEÃO, M. H. B. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Maranhão. In: KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. de (org.). Geologia e recursos minerais do estado do Maranhão. Belém, PA: CPRM, 2012. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17861?show=full. Acesso em: 22 mar. 2024.

SOUSA, T. R.; RAMOS, M. L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; CARVALHO, A. M. N2O emissions from soils under different uses in the Brazilian Cerrado – A review. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 45, n. 9, p. e0210093, 2021. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210093

SOUZA, R. S.; MORAIS, I. S.; ROSSET, J. S.; RODRIGUES, T. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Aggregation as soil quality indicator in areas under different uses and managements. Farming System, v. 2, n. 2, p. 100082, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100082

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed. Tec). Manual de métodos de análises de solo. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed. Tec). Manual de métodos de análises de solo. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. European Journal of Soil Science, v. 33, n. 1, p. 141-163, 1982. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v. 44, n. 3, p. 892-897, 1980. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

WINKLER, K.; FUCHS, R.; ROUNSEVELL, M.; HEROLD, M. Global land use changes are four times greater than previously estimated. Nature Communications, v. 12, n. 1, 2501, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2

XU, L.; YU, Q.; BAI, S.; WANG, M.; SUN, W.; XU, S.; SHI, X.; LU, J.; XIE, X.; QIU, W. Soil organic carbon impact on soil physical properties through quantity and quality modifications. Soil Advances, v. 2, n. 10, p. 100014, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100014

YUDINA, A.; KUZYAKOV, Y. Saving the face of soil aggregates. Global Change Biology, v. 11, n. 11, p. 3574-3577, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.14779

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.