

Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de cultivo de algodão no Cerrado da Bahia

Soil physical quality under different cotton cropping systems in the Cerrado of Bahia

Calidad física del suelo bajo diferentes sistemas de cultivo de algodón en el Cerrado de Bahía

Recebido: 21/11/2025 | Revisado: 28/11/2025 | Aceitado: 28/11/2025 | Publicado: 01/12/2025

João Henrique Zonta

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1113-2813>
Embrapa Algodão, Brasil

E-mail: joao-henrique.zonta@embrapa.br

Luis Fernando Perissoto

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6235-7714>
ESALQ-USP, Brasil

E-mail: luis.perissoto@usp.br

Julio Cesar Bogiani

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3357-7944>
Embrapa Territorial, Brasil

E-mail: julio.bogiani@embrapa.br

Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4612-0131>
Embrapa Algodão, Brasil

E-mail: alexandre-cunha.ferreira@embrapa.br

Resumo

Os solos arenosos do Cerrado apresentam fragilidade estrutural, especialmente quando manejados sob preparo convencional e monocultivo, o que compromete sua qualidade física e a sustentabilidade. Este estudo teve como objetivo avaliar, após 10 anos, os efeitos de diferentes sistemas de produção de algodão sobre as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa em Luís Eduardo Magalhães, Bahia. O experimento foi conduzido em blocos casualizados com seis sistemas de cultivo e quatro repetições, incluindo preparo convencional e sistemas de plantio direto com rotação de culturas. Foram determinados índice S, densidade aparente, porosidade total, macro e microporosidade, capacidade de retenção de água e água disponível, em amostras indeformadas coletadas até 60 cm de profundidade. As diferenças entre os sistemas ocorreram principalmente nas camadas superficiais (0–20 cm). O índice S indicou que, mesmo com plantas de cobertura, o solo manteve estrutura em processo de degradação, com valores <0,045 na superfície. A densidade aparente foi maior nos sistemas plantio direto, enquanto o preparo convencional apresentou maior macroporosidade e menor densidade, restritas à camada mobilizada. A água disponível não apresentou diferença entre os tratamentos, enquanto a capacidade de retenção de água foi sensível na profundidade de 20 cm. A análise de componentes principais mostrou distinção limitada entre os sistemas, com tendência de agrupamento relacionada à densidade e porosidade. Conclui-se que, em solos arenosos do Cerrado, a recuperação estrutural é lenta e limitada, mesmo após 10 anos de plantio direto com rotação de culturas, reforçando a necessidade de estratégias de manejo mais sustentáveis.

Palavras-chave: Índice S; Densidade do solo; Degradção do solo; Manejo do solo; Solos arenosos.

Abstract

Sandy soils of the Cerrado exhibit high structural fragility, especially when managed under conventional tillage and monocropping, which compromises their physical quality and the sustainability of cotton production. This study aimed to evaluate, after 10 years of cultivation, the effects of different cotton production systems, including conventional tillage and no-tillage systems with crop rotations, on the physical properties of a sandy-textured Red-Yellow Oxisol in the region of Luís Eduardo Magalhães, Bahia. The experiment was conducted in a randomized block design with six cropping systems and four replications. Undisturbed soil samples were collected down to 60 cm to assess the S index, bulk density, total porosity, macro and microporosity, water retention capacity, and available water. The results showed that differences among systems occurred mainly in the superficial layers (0–20 cm), which are more sensitive to management. The S index indicated that even treatments with cover crops maintained the soil in a degrading structural condition, with values <0.045 at the surface. Bulk density was higher in no-tillage systems, whereas conventional tillage presented greater macroporosity and lower density, restricted to the mobilized surface layer. No differences were observed among systems for available water or water retention throughout the soil profile.

Principal component analysis revealed limited distinction among systems, with a slight grouping trend associated with density and porosity. It is concluded that, in sandy Cerrado soils, structural recovery is slow and limited, even after 10 years of no-tillage crop rotation, reinforcing the need for more sustainable management strategies.

Keywords: S index; Soil bulk density; Soil degradation; Soil management; Sandy soils.

Resumen

Los suelos arenosos del Cerrado presentan fragilidad estructural, especialmente cuando se manejan bajo laboreo convencional y monocultivo, lo que compromete su calidad física y la sostenibilidad del sistema. Este estudio tuvo como objetivo evaluar, después de 10 años, los efectos de diferentes sistemas de producción de algodón sobre las propiedades físicas de un Latossolo Rojo-Amarillo de textura arenosa en Luís Eduardo Magalhães, Bahía. El experimento se condujo en un diseño de bloques al azar con seis sistemas de cultivo y cuatro repeticiones, incluyendo laboreo convencional y sistemas de siembra directa con rotación de cultivos. Se determinaron el índice S, la densidad aparente, la porosidad total, la macro y microporosidad, la capacidad de retención de agua y el agua disponible, en muestras indeformadas recolectadas hasta 60 cm de profundidad. Las diferencias entre los sistemas se manifestaron principalmente en las capas superficiales (0–20 cm). El índice S indicó que, incluso con plantas de cobertura, el suelo mantuvo una estructura en proceso de degradación, con valores <0,045 en la superficie. La densidad aparente fue mayor en los sistemas bajo siembra directa, mientras que el laboreo convencional presentó mayor macroporosidad y menor densidad, restringidas a la capa movilizada. El agua disponible no mostró diferencias entre los tratamientos, mientras que la capacidad de retención de agua fue sensible a los cambios en la profundidad de 20 cm. El análisis de componentes principales evidenció una diferenciación limitada entre los sistemas, con tendencia a la formación de grupos relacionados con la densidad y la porosidad. Se concluye que, en suelos arenosos del Cerrado, la recuperación estructural es lenta y limitada, incluso después de 10 años de siembra directa con rotación de cultivos, lo que refuerza la necesidad de estrategias de manejo más sostenibles.

Palabras clave: Índice S; Densidad del suelo; Degradación del suelo; Manejo del suelo; Suelos arenosos.

1. Introdução

O algodão (*Gossypium hirsutum L.*) é uma das principais commodities agrícolas mundiais, com ampla aplicação industrial, desde a produção têxtil até a fabricação de óleo, biodiesel e ração animal (Egbuta et al., 2017). O Brasil ocupa posição de destaque no cenário internacional, sendo o terceiro maior produtor e o principal exportador da cultura (Lanclos et al., 2025). Na safra 24/25 a área plantada de algodão no país foi de 2.086.100 ha, sendo que, desse total, mais de 95% foram cultivados na região do Cerrado com destaque para os estados de Mato Grosso e Bahia com cerca de 90% da produção nacional (CONAB, 2025).

O sucesso do cultivo de algodão no Cerrado é atribuído a topografia favorável à mecanização, e ao clima com estação chuvosa no verão e seca no outono, o que permite a produção de fibras de alta qualidade (Hoffmann et al., 2019). Uma região que tem se destacado nos últimos anos com crescimento do cultivo de algodão é a região do MATOPIBA, que se refere a uma área de cerca de 73 milhões de hectares, que abrange todo o estado do Tocantins e parte dos estados do Maranhão, Piauí e Bahia. Na última década, a região foi impulsionada pela expansão da atividade agrícola, que esteve relacionada à ampliação da infraestrutura viária, logística e energética, o que viabilizou o surgimento de polos de expansão da fronteira agrícola (Lumbreras, 2015), porém, é uma região presença significativa de solos arenosos.

Na região produtora da Bahia, concentrada no extremo oeste do estado, essas condições estão associadas a solos de textura arenosa que, associadas ao sistema de manejo convencional do solo e monocultivo, comumente praticados na região, podem representar grandes problemas de ordem física para o solo (Lal, 1997; Santos et al., 2020). Os baixos teores de argila e de matéria orgânica conferem um caráter peculiar aos solos arenosos, que apresentam elevada fragilidade e alta suscetibilidade à degradação por meio de diferentes processos naturais, sendo solos extremamente delicados em termos de sistemas de manejo (Melo & Ramos, 2025). Assim, revolvimento frequente e a baixa quantidade e qualidade de resíduos vegetais deixados pelo monocultivo do algodão aumentam o risco de degradação dos solos arenosos, naturalmente pouco estruturados e suscetíveis à erosão, configurando um cenário de alto risco para a cotonicultura na região oeste da Bahia (Huang & Hartemink, 2020).

Diante desse cenário, a adoção de estratégias que promovam a melhoria da qualidade física do solo é essencial para a sustentabilidade da cotonicultura no Cerrado baiano. Práticas conservacionistas, como o mínimo revolvimento do solo, a manutenção de palhada para cobertura e a diversificação de espécies com o uso de plantas de cobertura, têm sido apontadas como alternativas promissoras (Lal, 2015). As plantas de cobertura contribuem para maior agregação do solo, infiltração e retenção de água, além de reduzir a suscetibilidade à erosão (Adetunji et al., 2020). Diversos estudos relatam seus efeitos positivos em sistemas agrícolas no Cerrado, com destaque para espécies dos gêneros *Urochloa* e *Crotalaria*, que têm demonstrado boa compatibilidade com os sistemas de cultivo (Cherubin et al., 2025; Souza et al., 2025).

A utilização de plantas de cobertura na cotonicultura já é reconhecida como prática benéfica para a melhoria da qualidade física do solo em outros países (Nouri et al., 2019). Entretanto, no Brasil, essa prática ainda é pouco difundida, o que evidencia a necessidade de estudos que avaliem seus impactos sobre as propriedades físicas do solo, especialmente em regiões de destaque na produção de algodão, como o oeste baiano, onde predominam solos arenosos com elevada vulnerabilidade à degradação física.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar, após 10 anos, os efeitos de diferentes sistemas de produção de algodão sobre as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa em Luís Eduardo Magalhães, Bahia.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa experimental, de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018) com uso de estatística descritiva simples com classes de dados e valores de frequência absoluta (Shitsuka et al., 2014) e análise estatística (Vieira et al., 2021). O estudo foi conduzido em uma área de pesquisa localizada no município de Luís Eduardo Magalhães, pertencente a Fundação Bahia, cujas coordenadas geográficas são 12°05'36" S, 45° 42'37" O e altitude de 760 metros. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo A moderado (Santos et al. 2025). Previamente a instalação do ensaio, foram retiradas amostras de solo, deformadas e indeformadas, para determinação dos teores de areia, silte e argila e das características físicas do solo, na camada de 0-60 cm, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Teores de areia fina, areia grossa, silte e argila, nas diferentes profundidades, na camada de 0 a 60 cm do solo da área experimental.

Parâmetros	Profundidade do solo			
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
Areia grossa	33,40	29,70	26,84	24,22
Areia fina	47,35	47,58	45,86	45,28
Areia total	80,75	77,28	72,70	69,50
Silte	3,81	4,69	5,28	5,83
Argila	15,43	18,03	22,03	24,68
Classe textural	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco-argilo-arenoso	Franco-argilo-arenoso

Fonte: Dados da pesquisa.

Foram avaliados neste trabalho seis sistemas de cultivo de algodão em sequeiro, com irrigação suplementar, constituídos por monocultivo e sucessão em preparo convencional de solo, e quatro sistemas de rotação de culturas em sistema plantio direto (SPD), conforme descrição na Tabela 2. Os sistemas de produção foram implantados na safra 2012/2013, sendo as avaliações realizadas após 10 safras, no ano de 2022.

Tabela 2. Sistemas de cultivo de algodão em um Latossolo Vermelho Amarelo A moderado na região Oeste da Bahia.

Tratamento	Preparo do solo	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Monocultivo	Conv ¹	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão	Algodão
Milheto/ Algodão	Conv ¹	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão	Milheto/ Algodão
Rotação gramíneas	Sistema Plantio Direto ²	Milheto/ Algodão	Soja/ Milheto	Milho + Braquiária	Algodão/ Milheto	Soja/ Milheto	Milho + Braquiária	Algodão/ Milheto	Soja/ Milheto	Milho + Braquiária	Algodão
Rotação G+ L	Sistema Plantio Direto ²	Soja/ Crotalária	Milho + Braquiária	Algodão	Soja/ Crotalária	Milho + Braquiária	Algodão	Soja/ Crotalária	Milho + Braquiária	Algodão	Soja/ Crotalária
Rotação leguminosas	Sistema Plantio Direto ²	Milheto/ Algodão	Soja/ Crotalária	Milho + Crotalária	Algodão	Soja/ Crotalária	Milho + Crotalária	Algodão	Soja/ Crotalária	Milho + Crotalária	Algodão
Rotação cereais	Sistema Plantio Direto ²	Soja/ Sorgo	Algodão	Soja/ Sorgo	Algodão	Soja/ Sorgo	Algodão	Soja/ Sorgo	Algodão	Soja/ Sorgo	Algodão

¹Preparo do solo com aração e gradagem; ²Sem o revolvimento do solo com arados, grades, subsoladores e escarificadores. Rotação G+L = Rotação com gramíneas + leguminosas. Fonte: Dados da pesquisa.

O ensaio foi instalado sob um delineamento em blocos casualizados com 4 repetições. As unidades experimentais possuíam dimensões de 20 x 20 m, totalizando 400 m² de área total. Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas ao final da estação chuvosa, no mês de abril de 2022, utilizando trado tipo Uhland, em anéis volumétricos com diâmetro e altura de 5 x 2,5 cm. Em cada repetição foram coletadas duas amostras por profundidade (0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm), retiradas do centro das parcelas, embaladas com filme plástico e enviadas para laboratório, onde foram determinados os seguintes parâmetros: curva de retenção de água (método do extrator de Richards, nas tensões de 6, 8, 10, 33, 60, 100 e 1500 KPa), cujo ajuste foi realizado pelo modelo de van Genuchten (1980), com uso do software SWRC (Dourado-Neto et al., 2000), porosidade total, macro e microporosidade, determinada na mesa de tensão, na tensão de 6 KPa e densidade aparente do solo (Teixeira et al., 2017). Com base nos dados da curva de retenção e parâmetros ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), foi determinada a capacidade de retenção de água no solo e o índice S (Dexter, 2004), que avalia o grau de degradação do solo com base nos parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo.

A normalidade dos dados foi analisada utilizando o teste de Shapiro-Wilk, e não houve necessidade de transformação dos dados. Os parâmetros determinados foram avaliados estatisticamente através de análise de variância e teste de médias Tukey, com nível de significância ($p < 0,05$), através do software Sisvar 5.3 (Ferreira, 2011). Também foi realizada análise de componentes principais, utilizando os pacotes “MultivariateAnalysis” e “prcomp”, através do software R® (Bougeard & Dray, 2018).

3. Resultados e Discussão

Conforme apresentado na Tabela 3, os sistemas de cultivo de algodão apresentaram pouca influência sobre os parâmetros físico-hídricos do solo avaliados, onde apenas nas camadas mais superficiais (0-10 e 10-20 cm), que comumente

são mais afetadas pelo manejo, foram detectadas diferenças significativas ($p<0,05$) entre os tratamentos.

Tabela 3. Valores médios dos parâmetros índice S, densidade aparente do solo (Ds), capacidade de retenção de água no solo (CRA), água disponível no solo (AD), porosidade total (PT), macroporosidade (Map) e microporosidade (Mip) do solo de um Latossolo vermelho amarelo de textura franco arenosa, cultivado com algodão em diferentes sistemas de cultivo.

Propriedades físicas do solo	Profundidade do solo	Tratamentos					
		Monocultivo	Milheto/Algodão	Rotação gramíneas	Rotação G+L	Rotação leguminosas	Rotação cereais
Índice S	0-10 cm	0,032ab	0,015b	0,036a	0,024ab	0,036a	0,022ab
	10-20 cm	0,020b	0,026ab	0,033a	0,022b	0,028ab	0,023ab
	20-40 cm	0,048a	0,059a	0,040a	0,038a	0,041a	0,046a
	40-60 cm	0,080a	0,079a	0,069a	0,102a	0,078a	0,073a
Densidade aparente do solo (Ds) g cm ⁻³	0-10 cm	1,695a	1,771ab	1,768ab	1,831ab	1,792ab	1,855b
	10-20 cm	1,823a	1,809a	1,788a	1,855a	1,803a	1,822a
	20-40 cm	1,569a	1,569a	1,670a	1,661a	1,676a	1,667a
	40-60 cm	1,438a	1,459a	1,532a	1,570a	1,535a	1,512a
Capacidade de retenção de água CRA mm cm ⁻¹	0-10 cm	0,840a	0,837a	0,824a	0,854a	0,759a	0,864a
	10-20 cm	0,722ab	0,791a	0,710ab	0,731ab	0,674ab	0,629b
	20-40 cm	0,630a	0,684a	0,720a	0,657a	0,640a	0,593a
	40-60 cm	0,728a	0,712a	0,720a	0,683a	0,694a	0,680a
Água disponível mm	0 - 60 cm	42,77a	44,20a	44,13a	42,64a	40,99a	40,38a
Porosidade total cm ³ cm ⁻³	0-10 cm	0,325a	0,299a	0,308a	0,280a	0,305a	0,281a
	10-20 cm	0,272a	0,291a	0,299a	0,274a	0,289a	0,263a
	20-40 cm	0,355a	0,379a	0,362a	0,341a	0,348a	0,345a
	40-60 cm	0,400a	0,396a	0,389a	0,376a	0,380a	0,386a
Macroporosidade cm ³ cm ⁻³	0-10 cm	0,090ab	0,060ab	0,071ab	0,046ab	0,074ab	0,044b
	10-20 cm	0,046a	0,048a	0,069a	0,042a	0,070a	0,049a
	20-40 cm	0,129a	0,138a	0,121a	0,105a	0,104a	0,116a
	40-60 cm	0,152a	0,148a	0,133a	0,105a	0,122a	0,140a
Microporosidade cm ³ cm ⁻³	0-10 cm	0,115a	0,105a	0,116a	0,109a	0,112a	0,114a
	10-20 cm	0,091a	0,105a	0,104a	0,096a	0,091a	0,088a
	20-40 cm	0,093a	0,110a	0,108a	0,097a	0,099a	0,096a
	40-60 cm	0,122a	0,122a	0,121a	0,129a	0,123a	0,115a

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: Dados da pesquisa.

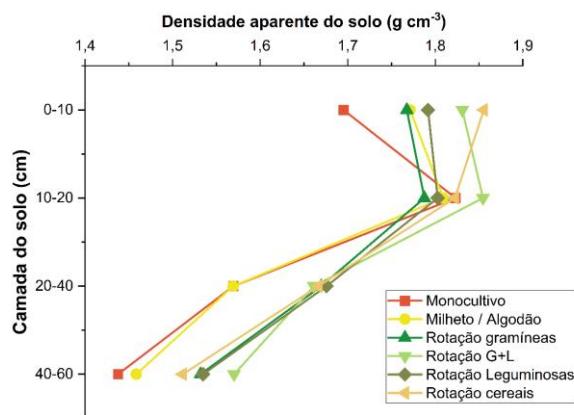
Com relação ao índice S, que é um indicador do nível de degradação do solo, na camada de 0-10 cm de profundidade, foi observada diferença significativa, sendo os maiores valores observados nos tratamentos monocultivo, rotação gramíneas e rotação leguminosas (acima de 0,03), porém apenas o tratamento milheto/algodão diferenciou-se destes, com valor de 0,015 (Tabela 3). Estes valores, segundo Andrade & Stone, 2009, demonstram que, mesmo para os melhores tratamentos, o solo está em processo de degradação, com valores de índice S<0,045. Para o milheto/algodão, o solo já se encontra com sua estrutura muito pobre ou degradada, com valor de índice S<0,025 (Andrade & Stone, 2009).

Quando se observa a camada de 10-20 cm (Tabela 3), que ainda sofre influência do preparo do solo com aração e gradagem, observamos que os dados seguem a mesma tendência da camada de 0-10 cm, com valores dentro da faixa considerada como sendo o solo em processo de degradação de sua estrutura física ou com sua estrutura muito pobre (S<0,025).

Nas camadas mais profundas, abaixo de 20 cm, observa-se maiores valores de índice S, próximos ou acima de 0,045, demonstrando que nessas camadas, com base nesse índice, o solo encontra-se com boa qualidade estrutural (Andrade & Stone, 2009; Dexter, 2004). Os maiores valores do índice S nas camadas de 20-40 e 40-60 cm são explicados pelos menores valores de densidade aparente do solo e maiores valores de porosidade total e macroporosidade do solo nestas camadas em relação às camadas superiores, e segundo Andrade & Stone (2009), o índice S é altamente correlacionado com esses parâmetros.

Com relação a densidade aparente do solo (D_s), observa-se na camada de 0-10 cm que o monocultivo com preparo do solo com aração e gradagem e cultivo sem plantas de cobertura, apresentou o menor valor ($D_s=1,695 \text{ g/cm}^3$) (Tabela 3), provavelmente consequência do revolvimento anual do solo e perda de matéria orgânica. Na média, os tratamentos com cultivo de algodão sob sistema plantio direto (SPD) com rotação de culturas foram os que apresentaram maior densidade aparente do solo nesta camada, o que é comum de se observar após muitos anos de adoção do sistema plantio direto em solo arenoso (Klein et al. 2008), cuja estrutura é muito pobre, e em regiões tropicais, com extensos períodos de seca, elevadas temperaturas e radiação solar, cujo acúmulo de carbono no solo, principalmente com maior grau de humificação, é extremamente complexo e demorado (Huang & Hartemink, 2020; Hao et al., 2023). Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2022), avaliando o cultivo de soja em um latossolo com diferentes sistemas de produção e cultivos de cobertura. Observa-se ainda que, no tratamento com cultivo convencional, porém com o plantio de milheto como planta de cobertura, a densidade do solo nesta camada ficou estatisticamente igual aos valores encontrados nos tratamentos de SPD, o que demonstra a importância dessa prática.

Figura 1. Valores de densidade aparente do solo nas diferentes camadas do perfil do solo em função dos diferentes sistemas de produção de algodão, após 10 safras de implantação dos mesmos, em solo de textura arenosa, na região de Luís Eduardo Magalhães, Bahia.



Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda com relação a densidade aparente do solo, observa-se que a partir de 20 cm de profundidade não se observa diferença estatística para este parâmetro quando comparados os diferentes sistemas de cultivo (Tabela 3), porém observa-se que é nesta camada onde encontram-se os maiores valores de densidade aparente do solo (Figura 1), que podem ser causados pela influência do preparo do solo (pé de arado ou pé de grade), ou mesmo pelo carreamento de argila, causado pela falta de estrutura do solo, que causa o entupimento dos poros e consequente aumento da densidade do solo. Interessante observar que o maior gradiente de densidade do solo, se comparado a camada de 0-10 com a camada de 10-20 cm foi encontrado no

monocultivo, cujos valores passaram de 1,695 g/cm³ para 1,823 g/cm³ (Tabela 3 e Figura 1), demonstrando que o preparo do solo teve efeito apenas na camada superficial, que por estar desagregada e revolvida, torna-se ainda mais propensa aos efeitos da erosão, o que pode acelerar o processo de degradação do solo, demonstrando a importância da utilização das práticas conservacionistas de solo e água, principalmente para solos arenosos com alto potencial de erodibilidade (Melo & Ramos, 2025).

Outro aspecto relacionado a esse maior gradiente de aumento da densidade aparente do solo no monocultivo, é o favorecimento da concentração de raízes na camada superficial (0-10 cm), tornando as plantas mais suscetíveis ao estresse hídrico em períodos de veranico (Silva et al., 2024, 2021) e menos produtivas, independentemente da disponibilidade de nutrientes no solo (Moura et al., 2021). Estes resultados corroboram com Koudahe et al. (2022), que relataram o efeito reduzido das plantas de cobertura sobre a densidade do solo (Ds) em solos arenosos e citam que as possíveis alterações ocorrem a longo prazo, dependendo das condições climáticas que afetam a disponibilidade de água para as culturas.

Alguns autores como Aggarwal et al. (1995) afirmam que solos arenosos com densidade aparente acima de 1,75 g/cm³ são considerados compactados, podendo essa compactação ser causada por distúrbios causados pelo cultivo, pastejo ou mesmo pelo entupimento dos poros do solo causados pela reorganização das partículas de areia, silte e argila, devido a fraca coesão existente entre as partículas de areia e argila (Bruand et al., 2005), o que pode explicar a maior densidade do solo em estudo, em todos os tratamentos, na camada até 20 cm de profundidade (Tabela 3 e Figura 1), mesmo 10 anos após a introdução do sistema plantio direto e rotação de culturas. O preparo conservacionista e o cultivo em sistema plantio direto podem melhorar as condições físicas do solo e aumentar o sequestro de carbono, no entanto, seus efeitos globais sobre o sequestro de carbono no solo e consequente melhoria das condições físicas pode ser limitados em solos arenosos, devido à menor área superficial específica das partículas de areia em comparação com solos argilosos (Sainju et al., 2002; Gangwar et al., 2006).

Consequentemente, pelos mesmos fatores já citados, é observado que, apesar de não diferir-se estatisticamente de alguns tratamentos em SPD, a macroporosidade (Tabela 3) e a porosidade total também foram maiores no tratamento com preparo de solo convencional, utilizando aração e gradagem, em comparação com os cultivos em SPD e com uso de culturas de cobertura na camada superficial (0-10 cm), sendo que nas camadas mais profundas (abaixo de 20 cm) os valores de porosidade total e macroporosidade aumentaram e não diferiram estatisticamente entre si, porém na camada de 10-20 cm foram encontrados os menores valores para ambos, que podem ser atribuídos a uma camada compactada do solo, formada pelo uso de implementos (cultivo convencional) ou carreamento de argila e entupimento dos poros (tratamentos em SPD). Os resultados encontrados estão de acordo com os apresentados por Hao et al. (2023), que em trabalho de revisão de literatura sobre a influência das plantas de cobertura nas propriedades físicas do solo, citam que a macroporosidade do solo apresenta um decréscimo de 22,2% em solos franco arenosos com o cultivo de plantas de cobertura. Silva et al. (2022) também encontraram em seu trabalho resultados que demonstram que a porosidade total e macroporosidade foram maiores no sistema convencional em comparação ao SPD, na camada mais superficial do solo, corroborando com os resultados aqui encontrados.

A macroporosidade tem sido descrita como a fração mais sensível sob diferentes práticas de manejo do solo, em contraste com a microporosidade, que geralmente permanece inalterada (Dal Ferro et al., 2014), corroborando com os resultados encontrados neste trabalho. Ainda, para Silva et al. (2021) e Arcoverde et al. (2015), os solos que apresentam porosidade total menor que 0,35 m³m⁻³, são classificados como inapropriados para à agricultura, condição esta encontrada nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, independente do sistema de produção avaliado.

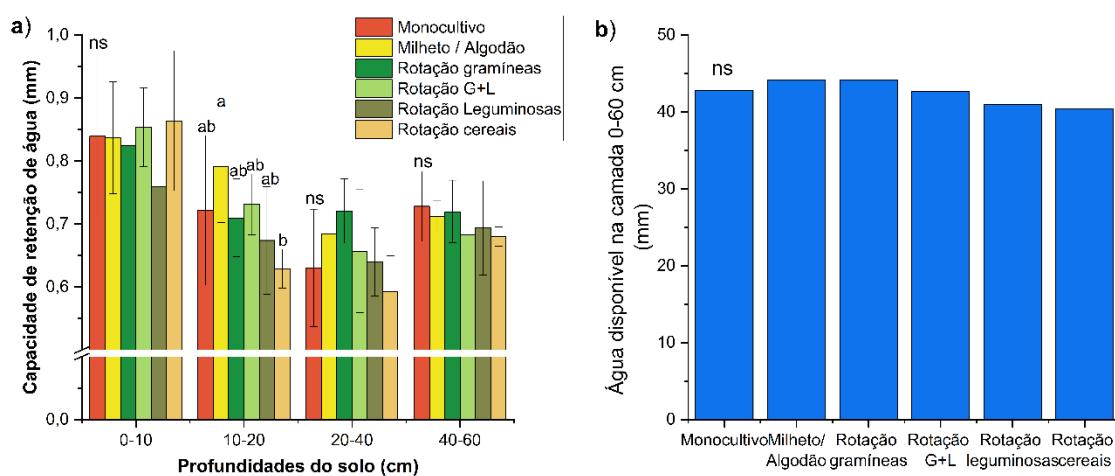
Segundo Ley et al. (1993), em solos arenosos, as partículas de argila e silte dispersas são depositadas nos pontos de contato entre as partículas grossas de areia e, à medida que o solo seca, isso causa o entupimento dos macroporos e

proporcionam um aumento densidade e resistência do solo à penetração, sendo que esse aumento da resistência à penetração tende a afetar negativamente a produtividade das culturas, devido à redução na taxa de alongamento das raízes e, consequentemente, acesso limitado à água e nutrientes (Colombi et al., 2018).

Neste estudo, os baixos valores de macroporosidade nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em alguns tratamentos (<20%) indicam um solo geralmente compactado, de acordo com Pagliai & Vignozzi (2003). De acordo com Reichert et al. (2007), valores de macroporosidades inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ são considerados limitantes para o bom desenvolvimento radicular da maioria das culturas agrícolas. Dessa forma, observou-se que os valores de macroporosidade encontrados nas camadas de 0-10 e 10-20 cm são inferiores ao valor crítico, enfatizando a falta de estrutura do solo. Essa condição é atribuída ao estado precário dos solos arenosos, agravado neste caso por um histórico de longo tempo de cultivo com aração e gradagem antes da instalação do ensaio. Observa-se que, nas camadas do perfil do solo abaixo de 20 cm, ou seja, menos afetadas pelo preparo do solo e pelas condições climáticas (chuvas intensas que causam erosão e elevadas temperaturas), a porcentagem de macroporos eleva-se substancialmente, com valores acima de 30% independente do tratamento, demonstrando uma melhor estruturação do solo nessas camadas.

Com relação a capacidade de retenção de água no solo, os tratamentos influenciaram este parâmetro apenas na camada de 10-20 cm, sendo o maior valor apresentado pela sucessão milheto/algodão em cultivo convencional. A adição do milheto como cultura de cobertura, pode ter ajudado na retenção de água no solo através do acúmulo de matéria orgânica, que auxilia na agregação do solo, principalmente em solos arenosos, mostrando a importância dessa prática, que elevou em 9,5% a CRA nesta camada do perfil do solo se comparado ao cultivo convencional. Se comparada a capacidade de retenção de água nos demais perfis analisados e a água disponível no solo na camada de 0 - 60 cm de profundidade, não houve diferença entre os tratamentos avaliados (Tabela 3 e Figuras 2a e 2b).

Figura 2. Capacidade de retenção de água nas diferentes camadas do perfil (a) e água disponível na camada de 0-60 cm (b) de um Latossolo Vermelho Amarelo A moderado cultivado com algodão em diferentes sistemas de produção, após 10 anos de cultivo, na região de Luís Eduardo Magalhães, Bahia. As letras indicam diferença significativa, enquanto nos indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Dados da pesquisa.

Porém, é importante observar que a água disponível nos tratamentos 4 e 6 foi um pouco superior ao tratamento com cultivo convencional, em torno de 3%. Os valores médios de capacidade de retenção de água e água disponíveis no solo estiveram de acordo com os considerados adequados para solos de textura arenosa, segundo Huang & Hartemink (2020). Esta pequena variação de valores observada entre os tratamentos provavelmente se deve ao fato de que em solos arenosos, a

retenção de água é influenciada pela rugosidade das partículas de areia fina, que afeta a espessura do filme de água aderido à sua superfície (Di Raimo et al., 2024). Ainda, os mesmos autores destacam que solos arenosos geralmente apresentam baixa capacidade de retenção de água, o que reduz a probabilidade de sucesso no cultivo agrícola desses solos em regiões tropicais.

Diversos estudos mostram que as culturas de cobertura foram associadas a aumentos relativos na água disponível (AD) em solos argilosos e franco-argilosos, a AD diminuiu em solos franco-arenosos. Sastre et al. (2018), demonstraram que o tipo de cultura de cobertura, a estação do ano e a profundidade do solo podem afetar AD de maneiras diferentes.

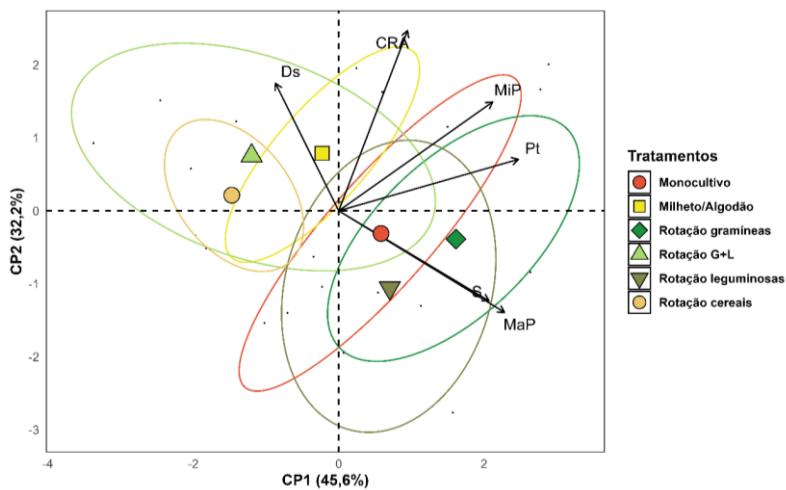
Assim, após 10 anos de introdução do cultivo de plantas de cobertura em SPD, e apesar da grande variedade de culturas utilizadas (gramíneas e leguminosas), observamos poucas variações com diferenças significativas ($p<0,05$) nas propriedades físicas do solo avaliadas na camada de 0-60 cm. Palese et al. (2014) encontraram diferenças significativas somente após 7 anos de vegetação espontânea permanente, em comparação ao manejo com revolvimento do solo. Segundo Sastre et al. (2018), regiões que apresentam ambiente seco e condições de solo pobres, têm retardo no processo de restauração do solo. Santos et al. (2011) afirmam que, num perfil de solo, horizontes arenosos dificultam a proteção física da matéria orgânica, a formação de agregados e em alguns casos apresentam dificuldade de manutenção desta fração orgânica no solo, o que traz como consequência menor poder de recuperação dos solos devido a pouca formação de agregados e ou baixa estabilidade de agregados.

Na análise de componentes principais realizada com os dados da camada mais influenciada pelos sistemas de cultivo (0-20 cm) (Figura 3), os dois primeiros componentes explicaram 77,8% da variabilidade total dos dados, sendo o componente principal 1 (CP1) responsável por 45,6% e o componente principal 2 (CP2) por 32,2%. As associações formadas pelos sistemas de cultivo não apresentaram uma separação clara em grupos distintos, sendo marcadas por intersecções. Apesar da separação não ter sido clara entre os sistemas de cultivo, há uma tendência de formação de 3 grupos. O primeiro foi composto pelo monocultivo, rotação gramíneas e rotação leguminosas, que foram fortemente influenciados pelas porosidades (total, macro e micro) e inversamente influenciados pela densidade aparente do solo, revelando a contribuição do revolvimento do solo por parte do monocultivo em promover maior macroporosidade e menor densidade, principalmente, e nos sistemas de rotação, esse comportamento se deu por conta da atuação dos sistemas radiculares das plantas de cobertura (gramíneas e leguminosas).

O segundo grupo que apresentou tendência de agrupamento foi composto pela rotação de G+L e rotação cereais, sendo influenciados principalmente pela densidade aparente do solo, onde podem estar sofrendo o efeito da mecanização já que quanto mais plantas no sistema, maior é o tráfego de máquinas para as operações de plantio e tratos culturais, e no caso da rotação com cereais, a colheita tanto da soja, como do sorgo provocam esse efeito mesmo com menos plantas no sistema comparados a rotação com gramíneas e leguminosas (Sattolo et al., 2021).

Por fim o terceiro grupo foi formado somente pela sucessão milheto/algodão, influenciada pela densidade aparente do solo e principalmente pela capacidade de retenção de água, por ter sido o tratamento que expressou maiores valores para esse indicador, principalmente na camada 10-20 cm, que pode ter sofrido influência da ocupação dos espaços porosos do solo, formados pela descompactação em consequência do preparo do solo, pelas raízes do milheto, melhorando a capacidade de retenção de água do solo.

Figura 3. Distribuição dos escores da análise de componentes principais para as propriedades físicas de um solo arenoso na camada de 0-20 cm, cultivado com algodão em diferentes sistemas de produção e rotações de culturas, após 10 anos de cultivo, em Luís Eduardo Magalhães - BA. Ds = densidade aparente do solo; CRA = capacidade de retenção de água; MiP = microporosidade; MaP = macroporosidade; Pt = porosidade total; S = índice S; CP = componentes principais.



Fonte: Dados da pesquisa.

4. Conclusão

Os resultados encontrados neste estudo demonstram que no período de tempo avaliado, os diferentes sistemas de produção e rotações de cultura influenciaram a qualidade física do solo somente nas camadas mais superficiais do solo, até a profundidade de 20 cm. A análise de componentes principais demonstrou que apesar da pequena influência dos diferentes sistemas de produção de algodão nas características físicas do solo, os sistemas de preparo do solo convencional com aração e gradagem e os sistemas cultivados em sistema plantio direto, com uso de braquiária na rotação de culturas, foram mais similares entre si com relação ao seu efeito na qualidade física do solo. Solos com textura arenosa, nas condições edafoclimáticas do Cerrado, são muito frágeis com relação às características físicas, e de difícil recuperação de sua estrutura, mesmo após 10 anos de implantação do sistema plantio direto para cultivo do algodoeiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Bahia pelo apoio técnico e operacional na condução dos experimentos de campo e ao FUNDEAGRO pelo apoio financeiro.

Referências

- Adefunji, A. T. et al. (2020). Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil & Tillage Research*, 204, 104717.
- Aggarwal, G. C. et al. (1995). Puddling and N management effects on crop response in a rice-wheat cropping system. *Soil & Tillage Research*, 36, 129–139.
- Andrade, R. S. da & Stone, L. F. (2009). Índice S como indicador da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 382–388.
- Arcoverde, N. S. et al. (2015). Qualidade física de solos em uso agrícola na região semiárida do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 1473–1482.
- Bougeard, S. & Dray, S. (2018). Supervised multiblock analysis in R with the ade4 package. *Journal of Statistical Software*, 86, 1–17.

- Bruand, A. et al. (2005). Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. In Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics., Khon Kaen, Thailand.
- Cherubin, M. R. et al. (2025). Long-term effects of crop diversification on soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystems. *Journal of Environmental Management*, 392, 126845.
- Colombi, T., et al. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth. *Science of The Total Environment*, 626, 1026–1035.
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. (2025). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2023/2024.
- Dal Ferro, N. et al. (2014). Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. *Soil and Tillage Research*, 140, 55–65.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201–214.
- Di Raimo, L. A. D. L. et al. (2024). Sand subfractions by proximal and satellite sensing: Optimizing agricultural expansion in tropical sandy soils. *Catena*, 234, 107604.
- Dourado-Neto, D. et al. (2000). Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia Agricola*, 57, 191–192.
- Egbuta, M. A. et al. (2017). Biological importance of cotton by-products relative to chemical constituents of the cotton plant. *Molecules*, 22, 93.
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35, 1039–1042.
- Gangwar, K. S. et al. (2006). Alternative tillage and crop residue management in wheat after rice in sandy loam soils of Indo-Gangetic plains. *Soil & Tillage Research*, 88, 242–252.
- Hao, X. et al. (2023). Are there universal soil responses to cover cropping? A systematic review. *Science of The Total Environment*, 861, 160600.
- Hoffmann, L. V. et al. (2019). Cotton production in Brazil and other South American countries. In *Cotton Production*. pp. 277–295.
- Huang, J. & Hartemink, A. E. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, 208.
- Klein, V. A. et al. (2008). Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, 38, 365–371.
- Koudahe, K., Allen, S. C. & Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, 10, 343–354.
- Lal, R. (2015). Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70, 55-62.
- Lal, R. (1997). Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 352, 997–1010.
- Lanclos, K. et al. (2025). Cotton outlook: The world and United States cotton outlook 2025.
- Ley, G. J. et al. (1993). Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil & Tillage Research*, 28, 1–13.
- Lumbrieras, J. F. et al. (2015). Aptidão agrícola das terras de MATOPIBA. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Nouri, A. et al. (2019). Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols. *Geoderma*, 337, 998–1008.
- Pagliari, M. & Vignozzi, N. (2003). The soil pore system as an indicator of soil quality. *Advances in GeoEcology*, 35, 72-82.
- Palese, A. M. et al. (2014). Influence of soil management on soil physical characteristics and water storage in a mature rainfed olive orchard. *Soil and Tillage Research*, 144, 96-109.
- Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Ramos, M. R. & Melo, R. S. de. (2025). Solos de textura arenosa: uma revisão acerca do uso e manejo no estado do Tocantins. *Revista Sapiência*, 14, 1–22.
- Reichert, J. M. et al. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais. In C. A. Ceretta, L. S. Silva & J. M. Reichert (Eds.), *Tópicos em Ciência do Solo* (pp. 49–134).
- Sainju, U. M. et al. (2002). Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils. *Soil & Tillage Research*, 63, 167–179.
- Santos, A. dos et al. (2020). Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. *European Journal of Agronomy*, 118, 126090.
- Santos, G. G. et al. (2011). Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 1339–1348.
- Santos, H. G. et al. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. 6^a ed. Embrapa, Brasília. 393 p.

- Sastre, B. et al. (2018). Three years of management with cover crops protecting sloping olive groves soils. *Catena*, 171, 115–124.
- Sattolo, T. M. S. et al. (2021). Effects of land use, tillage management, and crop diversification on soil physical quality in Cerrado agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal*, 85, 1799–1813.
- Shitsuka, R. et al. (2014). Matemática fundamental para tecnologia. (2ed). Editora Érica.
- Silva, J. F. G. et al. (2021). Are the yield of sunflower and Paiaguás palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? *Soil & Tillage Research*, 208, 104873.
- Silva, J. M. et al. (2022). Estimativa da macroporosidade e microporosidade em função de sistemas de manejo e plantas de cobertura em Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Research, Society and Development*, 11, e54411326833.
- Silva, P. L. F. da et al. (2021). Soil physical quality of arenosol in the environmental semiarid under agricultural integrated systems. *Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas*, 15, 598–616.
- Silva, P. L. F. da et al. (2024). Cover crops influence the physical hydric quality of a tropical sandy soil under no-tillage cotton cropping. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48.
- Souza, V. S. et al. (2025). Cover crops enhance soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystem. *Field Crops Research*, 322, 109755.
- Teixeira, P. C. et al. (2017). Manual de métodos de análise de solo (3a ed.). Brasília: Embrapa.
- Vieira, S. (2021). Introdução à bioestatística. Editora GEN/Guanabara Koogan.