



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

ANA PAULA MARTINS DE SOUSA ALMEIDA

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM CRONOSSEQUÊNCIA DE USO AGRÍCOLA
EM LATOSSOLO DO CERRADO PIAUIENSE

Bom Jesus – PI

2026

ANA PAULA MARTINS DE SOUSA ALMEIDA

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM CRONOSSEQUÊNCIA DE USO AGRÍCOLA
EM LATOSSOLO DO CERRADO PIAUIENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Ronny Sobreira Barbosa
Coorientadora: Profa. Dra. Cinthia Maria
Cordeiro Atanázio Cruz Silva

Bom Jesus – PI

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

A447q Almeida, Ana Paula Martins de Sousa.

Qualidade física do solo em cronosequência de uso agrícola em latossolo do cerrado piauiense / Ana paula Martins de Sousa Almeida. -- 2026.
67 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2026.

“Orientador: Prof. Dr. Ronny Sobreira Barbosa”.

“Coorientadora: Profa. Dra. Cinthia Maria Cordeiro Atanázio Cruz Silva”

1. Ciências agrárias. 2. Latossolo amarelo. 3. Qualidade do solo. I. Barbosa, Ronny Sobreira. II. Silva, Cinthia Maria Cordeiro Atanázio Cruz. III. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

ANA PAULA MARTINS DE SOUSA ALMEIDA

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM CRONOSSEQUÊNCIA DE USO AGRÍCOLA
EM LATOSSOLO DO CERRADO PIAUIENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Ciência do Solo.

Linha de Pesquisa: Recursos ambientais, uso e manejo do solo e da água.

Orientador: Prof. Dr. Ronny Sobreira Barbosa.

Coorientadora: Profa. Dra. Cinthia Maria Cordeiro Atanázio Cruz Silva.

Aprovada em: 08 de abril de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RONNY SOBREIRA BARBOSA**
Data: 13/04/2026 17:28:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ronny Sobreira Barbosa (UFPI)
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **SUELI RODRIGUES**
Data: 13/04/2026 16:17:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Sueli Rodrigues (UFPI)
Examinador Externo ao Programa

Documento assinado digitalmente
 **CINTHIA MARIA CORDEIRO ATANAZIO CRUZ SIL**
Data: 13/04/2026 17:49:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Cinthia M. C. A. Cruz Silva (UFPE)
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO SILVA DE SOUSA**
Data: 13/04/2026 17:56:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Silva Sousa (UFPI)
Examinador Externo ao Programa

Documento assinado digitalmente
 **JOAO DE DEUS FERREIRA E SILVA**
Data: 13/04/2026 14:41:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João de Deus Ferreira e Silva (USP)
Examinador Externo a instituição

Aos meus pais, Manoel Pereira de Sousa e
Luzia Martins de Sousa, por todo amor, apoio
incondicional e por serem minha base em todos
os caminhos.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada. À Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Professora Cinobelina Elvas (CPCE), pela oportunidade de realização deste curso e pelo suporte oferecido durante o período de formação. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pela estrutura, aprendizado e incentivo à pesquisa científica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu marido, agradeço imensamente pelo amor, paciência e apoio em todos os momentos desta caminhada. Sua compreensão diante das ausências, palavras de incentivo e parceria constante foram fundamentais para que eu tivesse forças para concluir esta etapa.

Ao meu orientador, Dr. Ronny, pela orientação dedicada, paciência, confiança e contribuições fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

À minha coorientadora, Cinthia, pelo apoio, incentivo e valiosas sugestões ao longo do percurso. A todo o Grupo de Pesquisa, pela colaboração, companheirismo e troca de conhecimentos, que tornaram esta experiência ainda mais enriquecedora.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo aqui meu sincero agradecimento.

RESUMO

A intensificação agrícola no Cerrado tem alterado a funcionalidade física de Latossolos sob cultivo mínimo prolongado. Este estudo avaliou os efeitos de diferentes tempos de adoção do cultivo mínimo (12, 18 e 24 anos) sobre a qualidade física de um Latossolo Amarelo distrófico, tendo vegetação nativa de Cerrado como referência. Amostras foram coletadas desde a superfície do solo até 0,5 m de profundidade para determinação da estabilidade de agregados, porosidade, densidade, resistência à penetração, carbono orgânico total e dos índices S e de estabilidade estrutural. A qualidade física apresentou acentuada estratificação vertical. O cultivo mínimo manteve a estabilidade estrutural na superfície (DMG entre 2,01–2,24 mm), mas reduziu a macroporosidade. A principal restrição estrutural ocorreu na camada intermediária (0.1–0.3 m), onde a densidade atingiu $\sim 1,60 \text{ g cm}^{-3}$ e a resistência à penetração aproximou-se dos limites críticos após duas décadas de uso. Em subsuperfície (0.3–0.5 m), a menor qualidade associou-se a fatores pedogenéticos. O carbono orgânico total apresentou forte estratificação, evidenciando seu papel na funcionalidade estrutural. Os índices S e SI permitiram distinguir alterações induzidas pelo manejo das limitações naturais. Embora o cultivo mínimo favoreça as condições superficiais, a persistência de restrições mecânicas em subsuperfície limita a sustentabilidade física de longo prazo. A persistência de restrições mecânicas em subsuperfície, mesmo sob cultivo mínimo, evidencia a necessidade de estratégias complementares (plantas de cobertura com sistema radicular profundo e manejo do tráfego) para assegurar a sustentabilidade física de longo prazo do solo.

Palavras-chave: Compactação do solo, Estoques de carbono, Indicadores de qualidade física, Latossolo amarelo, MATOPIBA.

ABSTRACT

Agricultural intensification in the Cerrado region has altered the physical functionality of Oxisols under prolonged minimum cultivation. This study evaluated the effects of different times of adoption of minimum tillage (12, 18, and 24 years) on the physical quality of a dystrophic Yellow Latosol, using native Cerrado vegetation as a reference. Samples were collected from the soil surface to 0.5 m depth to determine aggregate stability, porosity, density, penetration resistance, total organic carbon, and S and structural stability indexes. Physical quality showed marked vertical stratification. The minimum tillage maintained the structural stability at the surface (MWD between 2.01–2.24 mm) but reduced the macroporosity. The main structural constraint occurred in the intermediate layer (0.1–0.3 m), where the density reached $\sim 1.60 \text{ g cm}^{-3}$ and the penetration resistance approached critical limits after two decades of use. In the subsurface (0.3–0.5 m), the lower quality was associated with pedogenetic factors. Total organic carbon showed strong stratification, evidencing its role in structural functionality. The S and SI indices allowed us to distinguish changes induced by the management of natural limitations. While minimal tillage favors surface conditions, the persistence of mechanical constraints in the subsurface limits long-term physical sustainability. The persistence of mechanical constraints in the subsurface, even under minimal tillage, highlights the need for complementary strategies (deep root system cover crops and traffic management) to ensure the long-term physical sustainability of the soil.

Keywords: Soil compaction, Carbon stocks, Physical quality indicators, Yellow Latosol, MATOPIBA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.....	35
Figura 2 - Frações granulométricas e teores de óxidos de ferro.....	36
Figura 3 - Espectros de reflectância média por camada de solo (0.0-0.5 m)	37
Figura 4 - Coleta de amostras indeformadas em campo.....	39
Figura 5 - Diâmetro médio ponderado, agregados estáveis em água, distribuição dos agregados, macroporosidade, microporosidade e porosidade total em diferentes camadas do solo.....	45
Figura 6 - Densidade do solo, resistência a penetração, capacidade de campo, capacidade de ar, água disponível, S-index e carbono orgânico total em diferentes camadas do solo.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico de manejo das áreas cultivadas com 12, 18 e 24 anos de adoção de cultivo mínimo.....	37
Tabela 2 - Indicadores de qualidade do solo e respectivos limites críticos e faixas de classificação.....	43
Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos físicos de um Latossolo Amarelo distrófico típico avaliado em cinco camadas (0.0-0.5 m).....	46
Tabela 4 - Índice de estabilidade estrutural e classificação do risco de degradação em diferentes camadas de Latossolo Amarelo.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Caracterização da área de estudo e contexto regional.....	14
2.1.1	Bioma Cerrado e a expansão agrícola no MATOPIBA.....	14
2.1.2	O Cerrado piauiense: peculiaridades edafoclimáticas.....	16
2.2	Atributos físicos de Latossolos.....	18
2.2.1	Gênese e morfologia dos Latossolos.....	18
2.2.2	Estabilidade estrutural e agregação.....	19
2.2.3	Comportamento mecânico e suscetibilidade a compactação.....	20
2.3	Qualidade física do solo em sistemas agrícolas.....	21
2.3.1	Conceitos e evolução da qualidade do solo.....	21
2.3.2	Principais indicadores de qualidade física do solo.....	22
2.3.3	Sistema poroso: macroporos, microporos e porosidade total.....	23
2.3.4	Compactação do solo: causas, consequências e valores críticos.....	24
2.4	Dinâmica do carbono orgânico e sua relação com a qualidade física.....	26
2.4.1	Carbono orgânico como agente estruturante em solos tropicais.....	26
2.4.2	Relação carbono-agregação em Latossolos.....	27
2.4.3	Alterações nos teores de carbono ao longo do tempo de cultivo.....	28
2.5	Sistemas conservacionistas e cronossequência agrícola no Cerrado.....	29
2.5.1	Evolução dos sistemas de manejo.....	29
2.5.2	Cronossequência como abordagem metodológica para estudos temporais.....	31
2.5.3	Efeitos do tempo de uso agrícola sobre os atributos físicos.....	32
2.5.4	Mitigação da degradação física via sistemas conservacionistas.....	33
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1	Localização e área de estudo.....	35
3.2	Caracterização e históricos das áreas estudadas.....	36
3.3	Delineamento experimental.....	39
3.4	Variáveis analisadas.....	40
3.4.1	Carbono orgânico total.....	40
3.4.2	Porosidade do solo.....	40
3.4.3	Densidade do solo.....	41

3.4.4	Resistencia do solo a penetração.....	41
3.4.5	Capacidade de campo.....	41
3.4.6	Capacidade de aeração.....	41
3.4.7	Água disponível.....	41
3.4.8	Estabilidade de agregados.....	42
3.4.9	S-index e SI.....	42
3.5	Análise estatística.....	43
4	RESULTADOS.....	46
5	DISCUSSÃO.....	51
6	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro é reconhecido como um dos mais importantes biomas tropicais do planeta, destacando-se pela elevada biodiversidade e pelo papel estratégico que exerce na produção agropecuária nacional (Kato *et al.*, 2019; Giles *et al.*, 2026). Ocupando aproximadamente 24% do território brasileiro (Klink; Machado, 2005), o bioma caracteriza-se pelo clima tropical sazonal, associado a condições geomorfológicas predominantemente planas, fatores que historicamente favorecem a expansão das atividades agrícolas (Sano *et al.*, 2020).

O sudoeste do estado do Piauí insere-se na região denominada MATOPIBA, formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, considerada uma das principais fronteiras de expansão agrícola do país, com impactos relevantes no desenvolvimento socioeconômico regional (Santos *et al.*, 2016; Bragança, 2018). No território piauiense, o Cerrado ocupa cerca de 12 milhões de hectares, consolidando-se como área estratégica para a produção de grãos e para a intensificação do uso agrícola nessa fronteira produtiva (CONAB, 2023). Nesse contexto de expansão, a sustentabilidade da produção depende diretamente da manutenção da qualidade do solo, o que torna essencial o monitoramento de áreas já consolidadas sob diferentes sistemas de manejo.

Apesar do potencial produtivo, predominam na região os Latossolos distróficos, caracterizados por elevada acidez, baixa fertilidade natural e forte intemperismo, o que exige práticas corretivas e manejo adequado para garantir a sustentabilidade agrícola (Pires *et al.*, 2022). Embora esses solos sejam considerados fisicamente adequados devido à elevada profundidade e boa drenagem natural (Resende *et al.*, 2014), a intensificação do uso agrícola prolongado provoca mudanças expressivas em sua qualidade física. Dentre essas alterações, destacam-se o aumento da densidade do solo, a redução da macroporosidade e a menor infiltração de água, processos associados à compactação e à diminuição da continuidade dos poros (Pavei *et al.*, 2021), os quais comprometem diretamente o crescimento radicular e a produtividade das culturas.

Estudos realizados na região do MATOPIBA, incluindo áreas do Cerrado piauiense, têm demonstrado que a conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas mecanizados promove alterações expressivas na qualidade física do solo. Pesquisas conduzidas nessa fronteira agrícola evidenciam aumentos na densidade do solo e na resistência mecânica à penetração, bem como reduções na macroporosidade e na estabilidade de agregados, principalmente nas camadas superficiais mais sujeitas ao tráfego de máquinas (Silva *et al.*, 2014). Fontenele *et al.* (2009), ao estudarem um Latossolo Amarelo Distrófico no Cerrado do

Piauí, observaram aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água em áreas cultivadas em comparação à vegetação nativa.

Por outro lado, trabalhos mais recentes indicam que a adoção de sistemas conservacionistas, com menor intensidade de revolvimento, pode favorecer a melhoria gradual da estrutura do solo, promovendo maior continuidade de poros e melhor distribuição do tamanho de agregados ao longo do tempo de uso agrícola (Santos *et al.*, 2018). Entretanto, a magnitude e a velocidade dessa recuperação estrutural ainda são pouco compreendidas, especialmente quando se considera a estratificação vertical do solo e as limitações naturais impostas pela mineralogia oxídica dos Latossolos em profundidade.

Apesar desses avanços, ainda são limitadas as informações sobre a dinâmica da qualidade física do solo em áreas sob diferentes tempos de adoção de cultivo mínimo no Cerrado do estado do Piauí. Especificamente, não há estudos que integrem múltiplos indicadores físicos para avaliar comparativamente os efeitos do tempo de uso agrícola (12, 18 e 24 anos) sobre a estrutura, estabilidade de agregados, distribuição do sistema poroso e estoques de carbono orgânico em Latossolos dessa região. Adicionalmente, a utilização de indicadores integradores da qualidade física, como o índice estrutural do solo e o índice S, tem se mostrado promissora para sintetizar as complexas interações entre textura, matéria orgânica e distribuição do sistema poroso (D'haene, 2012). No entanto, a aplicação desses indicadores em Latossolos do Cerrado piauiense sob diferentes tempos de cultivo ainda não foi suficientemente explorada, representando uma lacuna científica que o presente estudo busca preencher.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade física do solo em áreas com diferentes tempos de cultivo mínimo (12, 18 e 24 anos), comparadas a uma área de referência sob vegetação nativa, em Latossolo Amarelo do Cerrado piauiense. Especificamente, buscou-se: i) avaliar o impacto do tempo de cultivo mínimo sobre atributos físicos (densidade, porosidade, resistência à penetração, capacidade de campo, água disponível e capacidade de aeração); ii) quantificar a estabilidade de agregados e os estoques de carbono orgânico total; iii) testar a sensibilidade de indicadores integradores (índice S e índice estrutural) para capturar gradientes de degradação estrutural ao longo do perfil. Espera-se que os resultados gerem subsídios técnico-científicos para o planejamento do uso da terra no Cerrado piauiense, de modo a conciliar a produtividade agrícola com a conservação da qualidade estrutural do solo em uma das mais dinâmicas fronteiras agrícolas do país.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização da área de estudo e contexto regional

2.1.1 Bioma Cerrado e a expansão agrícola no MATOPIBA

O Cerrado brasileiro constitui uma das savanas tropicais mais extensas e biodiversas do planeta, ocupando aproximadamente dois milhões de quilômetros quadrados do território nacional e sendo reconhecido como *hotspot* global de biodiversidade prioritário para ações de conservação (Alvalá; von Randow, 2012). Sua vegetação organiza-se em um mosaico complexo de formações fitofisionômicas, que conferem ao bioma notável diversidade estrutural e funcional, fundamental para a prestação de serviços ecossistêmicos essenciais, com destaque para a regulação hídrica e a manutenção da biodiversidade regional (Rampelotto *et al.*, 2013; Cardoso *et al.*, 2025). A riqueza biológica do Cerrado abrange desde mamíferos de pequeno porte e anfíbios até uma vasta comunidade microbiana edáfica, cuja composição e dinâmica são particularmente sensíveis às alterações promovidas pelo uso e ocupação do solo (Silva-Leite *et al.*, 2008; Rampelotto *et al.*, 2013; Carmignotto; Pardini; Vivo, 2022).

Nesse contexto de elevada relevância ambiental, a função hidrológica do Cerrado assume papel estratégico em escala nacional, atuando como área de recarga para importantes bacias hidrográficas brasileiras e contribuindo decisivamente para a manutenção da qualidade e da disponibilidade dos recursos hídricos (Pompeu *et al.*, 2019). Apesar dessa importância ecológica, originalmente os solos do Cerrado são caracterizados por elevada intemperização, acidez acentuada e fertilidade naturalmente baixa (Oliveira *et al.*, 2023). No entanto, a partir da década de 1970, avanços significativos nas técnicas de correção da acidez e manejo nutricional especialmente por meio da calagem, adubação mineral e orgânica, aliados a sistemas de manejo conservacionista viabilizaram a incorporação progressiva dessas áreas ao processo produtivo agrícola, superando as limitações edáficas naturais (Reis Júnior *et al.*, 2012; Gasques *et al.*, 2025).

Essa transformação do Cerrado em fronteira agrícola tornou-se particularmente intensa na região conhecida como MATOPIBA, acrônimo que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, configurando a mais recente e dinâmica fronteira agrícola do Brasil (Coca; Soyer; Ricardo Junior, 2023; Melo *et al.*, 2024). Sua consolidação como polo produtor de grãos, com destaque para a soja, é atribuída à combinação de fatores como disponibilidade territorial, predominância de relevos planos a suavemente ondulados que favorecem a

mecanização intensiva, e adoção de sistemas produtivos modernos (Buainain; Garcia; Vieira Filho, 2018; Zalles *et al.*, 2018). Essa expansão tem gerado impactos econômicos positivos expressivos, refletidos no aumento do Produto Interno Bruto (PIB) regional e na melhoria da infraestrutura (Bragança, 2018; Pereira; Castro; Porcionato, 2018).

Contudo, a rápida conversão de áreas nativas em sistemas de produção em larga escala tem induzido alterações profundas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Melo *et al.*, 2024; Arruda *et al.*, 2025). Estudos indicam que práticas agrícolas intensivas, como o tráfego de maquinário pesado e o cultivo contínuo, promovem processos de compactação e degradação estrutural, comprometendo a capacidade de retenção hídrica e a funcionalidade do solo para o desenvolvimento radicular das culturas (Pereira *et al.*, 2018; Feitosa *et al.*, 2020). Tais alterações impõem desafios significativos à sustentabilidade produtiva e ambiental da região, especialmente em um contexto de predominância de solos altamente intemperizados e naturalmente suscetíveis à degradação quando submetidos a manejos inadequados (Oliveira *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, o Cerrado piauiense, inserido no contexto do MATOPIBA, apresenta regime climático tropical sazonal, caracterizado por estação seca bem definida e precipitação concentrada em poucos meses do ano. Essa sazonalidade exerce influência direta sobre o conteúdo de água no solo, a dinâmica da matéria orgânica e a estabilidade estrutural, atributos que condicionam o desempenho agrônômico das culturas (Pereira *et al.*, 2018). As propriedades físicas do solo notadamente a macroporosidade, a microporosidade, a densidade e a resistência à penetração atuam como fatores determinantes para o crescimento radicular e, em última instância, para a produtividade agrícola, sendo particularmente sensíveis às práticas de uso e manejo adotadas (Pereira *et al.*, 2018).

Em resposta aos desafios impostos pela intensificação agrícola, estratégias de manejo que conciliem produtividade e conservação dos recursos naturais têm sido amplamente investigadas. Sistemas conservacionistas, como o plantio direto, têm demonstrado potencial para melhorar a resistência estrutural e a porosidade do solo, contribuindo para a recuperação de áreas já degradadas (Feitosa *et al.*, 2020). Adicionalmente, sistemas integrados de produção especialmente a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) têm se mostrado eficazes na modulação positiva das comunidades microbianas e na melhoria integrada da qualidade química e física do solo, constituindo alternativas promissoras para a manutenção da produtividade aliada à conservação ambiental na região (Rampelotto *et al.*, 2013; Bidadari *et al.*, 2025; Funnicelli *et al.*, 2025).

Paralelamente, em áreas de Cerrado recentemente convertidas para agricultura, o manejo da fertilidade por meio da aplicação de corretivos como calcário e gesso constitui prática essencial para a melhoria do ambiente químico e físico do solo, favorecendo rendimentos mais elevados em culturas como a soja (Oliveira *et al.*, 2024). A geomorfologia regional, caracterizada por superfícies planas a suavemente onduladas, favorece a mecanização e a intensificação agrícola, mas exige atenção redobrada às práticas conservacionistas para mitigar processos erosivos e perdas produtivas, especialmente em áreas com declividade mais acentuada (Ferraz-Almeida; Silva; Ribeiro, 2023). A interação entre clima, relevo, material de origem e manejo condiciona a evolução estrutural do solo, determinando sua capacidade de suportar diferentes sistemas produtivos em longo prazo (Ferraz-Almeida; Mota, 2021).

Assim, a caracterização detalhada do ambiente regional do Cerrado e do MATOPIBA constitui etapa fundamental para subsidiar análises específicas sobre os efeitos do uso agrícola na qualidade física dos Latossolos. Compreender a dinâmica de transformação dessas áreas nativas em sistemas produtivos, considerando diferentes tempos e tipos de manejo, é essencial para interpretar as consequências do uso sobre os atributos físicos do solo e para orientar práticas que conciliem o aumento da produtividade com a conservação dos recursos naturais (Alberto *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2024). Portanto, o desenvolvimento de políticas públicas e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis tornam-se imprescindíveis para assegurar a continuidade da produção agropecuária de forma equilibrada com a preservação dos ecossistemas do Cerrado (Coutinho, 1990; Tiutiunnyk, 2017;).

2.1.2 O Cerrado piauiense: peculiaridades edafoclimáticas

O Cerrado piauiense, localizado na porção setentrional do bioma, apresenta especificidades edafoclimáticas que influenciam diretamente os atributos físicos do solo e a resposta desses solos às práticas agrícolas. Na região, predominam Latossolos profundos, de textura média a argilosa, com estrutura granular bem desenvolvida e elevada porosidade total. No entanto, conforme destaca Silva *et al.* (2017), esses solos caracterizam-se pela baixa atividade de argila e reduzidos teores de matéria orgânica, atributos que os tornam particularmente vulneráveis a alterações estruturais quando submetidos à pressão antrópica, especialmente em sistemas de agricultura mecanizada intensiva.

Diante dessa vulnerabilidade intrínseca, estudos conduzidos na região sudoeste do Piauí têm investigado os impactos do uso agrícola sobre a qualidade física dos Latossolos. Silva *et al.* (2017) constataram que práticas agrícolas intensivas, notadamente o cultivo contínuo e o

tráfego de máquinas agrícolas, promovem elevação da densidade do solo e redução da porosidade e da estabilidade de agregados. Corroborando esses achados, Araújo *et al.* (2010) identificaram que a compactação subsuperficial constitui um dos principais indicadores de degradação física em áreas submetidas ao cultivo convencional na região. Por outro lado, sistemas de manejo conservacionista têm demonstrado potencial para mitigar esses impactos ao longo do tempo. Lobato *et al.* (2017) evidenciaram que o plantio direto favorece o aumento dos teores de carbono orgânico do solo, promovendo melhoria gradativa das propriedades físicas. Torres *et al.* (2019), em estudo complementar, observaram que, embora áreas sob plantio direto apresentem valores de densidade e resistência à penetração superiores aos observados em vegetação nativa, essas áreas exibem recuperação significativa da macroporosidade e da estabilidade de agregados após períodos superiores a cinco anos de adoção do sistema.

A dinâmica hídrica regional, por sua vez, é condicionada pelo regime tropical sazonal, marcado por alta concentração pluviométrica em meses específicos intercalados por períodos de estiagem prolongada. De acordo com Santos *et al.* (2021), essa sazonalidade induz ciclos sucessivos de expansão e contração estrutural do solo, além de variações significativas na resistência mecânica, afetando diretamente a disponibilidade hídrica para as plantas e o funcionamento dos sistemas produtivos. Ademais, conforme discutido por Santos *et al.* (2021), essas condições climáticas aceleram os processos intemperizantes e promovem rápida instabilização da matéria orgânica, o que reforça a necessidade de adoção de manejos conservacionistas voltados à preservação da estabilidade estrutural dos solos.

Além dos condicionantes climáticos, a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo na região é fortemente influenciada pela interação entre relevo, material de origem e clima local. Schossler *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2021) destacam que essa complexa interação exige a implementação de práticas de manejo adaptadas às especificidades regionais, tais como a limitação do tráfego de máquinas, o preparo reduzido do solo e a adoção de rotação adequada de culturas. Essas medidas, segundo os autores, são essenciais para a manutenção da porosidade, da estabilidade de agregados e da qualidade física do solo, especialmente em cronossequências submetidas ao uso agrícola intensivo.

Dessa forma, a compreensão aprofundada das condições edafoclimáticas do Cerrado piauiense, particularmente no que se refere à dinâmica dos Latossolos sob diferentes manejos agrícolas, constitui etapa fundamental para a interpretação adequada da evolução estrutural desses solos. Silva *et al.* (2017) e Santos *et al.* (2021) ressaltam que esse conhecimento subsidia a proposição de estratégias de manejo conservacionistas que conciliem a sustentabilidade da

produção agrícola com a preservação da qualidade física do solo nessa importante e dinâmica fronteira agrícola.

2.2 Atributos físicos de Latossolos

2.2.1 Gênese e morfologia dos Latossolos

Os Latossolos constituem a classe de solo predominante nas regiões úmidas e subúmidas do Brasil, com expressiva ocorrência no bioma Cerrado. Sua formação está associada a longos períodos de intemperismo químico sob clima tropical caracterizado por temperaturas elevadas e precipitação abundante. Ker (1997) e Macedo e Bryant (1987) destacam que esse processo promove intensa lixiviação de bases e alteração mineralógica dos constituintes do material de origem, resultando em perfis profundos e pouco diferenciados. Os autores enfatizam que esses solos apresentam predomínio de minerais secundários de baixa atividade, como caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, minerais esses que são essenciais para a organização estrutural característica da classe.

Do ponto de vista físico, os Latossolos exibem atributos que os tornam particularmente favoráveis ao desenvolvimento radicular das plantas. Apresentam elevada friabilidade, boa permeabilidade e estrutura granular bem desenvolvida, características que favorecem a porosidade total e o movimento da água no perfil do solo. Conforme apontam Fernandes *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2023), as colorações desses solos que variam entre tons avermelhados, amarelados e brunados refletem o grau de cristalização dos óxidos de ferro presentes, constituindo um importante indicador morfológico do estágio de intemperização.

No entanto, quando submetidos ao uso agrícola intensivo, os Latossolos podem apresentar deterioração estrutural significativa. Severiano *et al.* (2011a) e Severiano *et al.* (2013) demonstraram que o tráfego de máquinas pesadas, especialmente em sistemas que envolvem revolvimento frequente do solo ou baixa adição de resíduos orgânicos, induz aumentos expressivos na densidade do solo, redução da macroporosidade e incremento da resistência à penetração radicular. Feitosa *et al.* (2020), em estudo complementar, constataram que essas alterações comprometem o funcionamento físico-hídrico do solo e, consequentemente, a produtividade das culturas.

A suscetibilidade desses solos à compactação, conforme evidenciado por Severiano *et al.* (2013) e Sattolo *et al.* (2021), está diretamente relacionada à textura do solo. Esses autores observaram que solos com maior teor de argila apresentam maior porosidade natural, porém

exibem maior risco de compactação quando submetidos a atividades agrícolas mecanizadas. Sattolo *et al.* (2021) ressaltam, nesse contexto, que o manejo adequado se torna fundamental para preservar a qualidade física do solo, evitando perdas estruturais que impactam negativamente a sustentabilidade da produção.

Além dos efeitos do manejo, a conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas tem induzido modificações mensuráveis nas propriedades físicas dos Latossolos ao longo do tempo de uso. Trabaquini, Formaggio e Galvão (2013) e Trabaquini *et al.* (2017) demonstraram que essas alterações seguem padrões temporais distintos, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e adaptação das práticas de manejo voltadas à conservação do solo e à manutenção de sua qualidade física.

Dessa forma, o conhecimento aprofundado sobre a gênese, a morfologia e as propriedades físicas dos Latossolos, alinhado à compreensão dos efeitos do manejo agrícola, constitui base imprescindível para o desenvolvimento de estratégias que promovam a produtividade agrícola sustentável e a conservação do solo nos ecossistemas do Cerrado. Fernandes *et al.* (2016) e Moreira *et al.* (2018) enfatizam que essa integração entre conhecimento pedológico e manejo adequado é essencial para conciliar o aproveitamento agrícola com a preservação da capacidade produtiva desses solos em longo prazo.

2.2.2 Estabilidade estrutural e agregação

A estrutura do solo, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados como os Latossolos, resulta da interação complexa entre partículas minerais, matéria orgânica e agentes estabilizadores. Avanzi *et al.* (2011) e Ndzana *et al.* (2021) destacam que óxidos de ferro e alumínio, substâncias húmicas e exsudatos radiculares atuam como pontes de ligação, promovendo a coesão estrutural e a manutenção de uma estrutura granular bem desenvolvida. Esses componentes, conforme enfatizado pelos autores, influenciam diretamente as propriedades físicas do solo que governam o funcionamento físico-hídrico, incluindo infiltração, retenção de água, difusão de gases e crescimento radicular.

A estabilidade dos agregados, por sua vez, está intimamente relacionada à quantidade e à qualidade da matéria orgânica presente no solo, atributos que variam conforme o uso e o manejo adotados. Vizioli e Fernandes (2018) e Souza *et al.* (2009) demonstram que, em ambientes agrícolas contínuos, a redução da cobertura vegetal, o tráfego de máquinas e a diminuição da adição de resíduos orgânicos tendem a promover a desagregação das unidades estruturais. Souza *et al.* (2009) observaram que esse processo leva à redistribuição das frações

granulométricas e à obstrução dos poros maiores, resultando em aumento da densidade do solo e maior suscetibilidade à compactação.

Diante desses impactos, estudos conduzidos em Latossolos sob diferentes sistemas de manejo têm demonstrado que a avaliação da agregação constitui um importante indicador da qualidade física do solo. Freitas *et al.* (2018) evidenciaram que a análise da estabilidade de agregados permite detectar os impactos promovidos pela intensificação agrícola, fornecendo subsídios para a adoção de práticas conservacionistas. Avanzi *et al.* (2011) e Souza *et al.* (2009) complementam que a manutenção ou recuperação da estabilidade estrutural dos agregados é fundamental para garantir a sustentabilidade do uso do solo em longo prazo.

Portanto, o conhecimento aprofundado dos mecanismos que envolvem a formação e a manutenção da estabilidade estrutural em Latossolos constitui base essencial para interpretar as alterações físicas decorrentes do uso agrícola. Ndzana *et al.* (2021) e Vizioli e Fernandes (2018) ressaltam que esse conhecimento subsidia o desenvolvimento de estratégias de manejo orientadas à minimização da degradação estrutural, promovendo a conservação da qualidade física do solo em sistemas produtivos.

2.2.3 Comportamento mecânico e suscetibilidade a compactação

O comportamento mecânico dos Latossolos no bioma Cerrado é condicionado por um conjunto de fatores intrínsecos e extrínsecos que atuam de forma integrada. Severiano *et al.* (2013) destaca que, entre os fatores intrínsecos, destacam-se a textura, a mineralogia, o teor de matéria orgânica e o arranjo estrutural do solo. Já os fatores extrínsecos relacionam-se diretamente ao manejo agrícola adotado, com ênfase para o tráfego de máquinas e as condições de umidade no momento das operações de campo.

A textura do solo, conforme evidenciado por Severiano *et al.* (2011b), exerce papel fundamental na suscetibilidade à compactação. Esse autor demonstrou que o aumento do teor de argila amplia a vulnerabilidade do solo à compactação, uma vez que solos mais argilosos apresentam maior porosidade natural e maior capacidade de retenção de água, associadas a uma densidade naturalmente mais baixa. Essas características, embora favoráveis sob condições naturais, tornam esses solos mais propensos a alterações estruturais quando submetidos a cargas mecânicas excessivas.

A compactação do solo, em sistemas agrícolas intensivos, manifesta-se frequentemente em camadas subsuperficiais, sendo associada à mecanização intensa e ao uso contínuo do solo. Feitosa *et al.* (2020) constataram que esse processo resulta na redução da macroporosidade, no

aumento da densidade do solo e no incremento da resistência à penetração radicular. Silva, N. *et al.* (2014) complementam que essas alterações comprometem a dinâmica hídrica do solo, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial, o que eleva a suscetibilidade do solo aos processos erosivos.

Diante desses impactos, sistemas conservacionistas têm sido amplamente investigados como alternativas para mitigar os efeitos da compactação. Valpassos *et al.* (2001) demonstraram que o plantio direto, aliado à manutenção contínua da cobertura vegetal, promove a recuperação gradual da estrutura do solo por meio da ação biológica e do incremento dos teores de matéria orgânica. Ngolo *et al.* (2019) e Ngolo *et al.* (2023), em estudos de longa duração conduzidos em Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo, observaram que, apesar dos impactos iniciais decorrentes da remoção da vegetação nativa, esses solos apresentam certa resiliência física. Ngolo *et al.* (2023) ressaltam, no entanto, que as limitações climáticas podem influenciar negativamente a manutenção da qualidade física mesmo em sistemas conservacionistas como o plantio direto.

Portanto, o estudo do comportamento mecânico e da suscetibilidade à compactação nos Latossolos requer a integração entre o entendimento dos processos pedogenéticos naturais e a análise das modificações causadas pelo manejo agrícola. Severiano *et al.* (2011b) e Severiano *et al.* (2013) enfatizam que esse conhecimento é fundamental para estabelecer limites críticos de uso e para desenvolver estratégias de manejo que assegurem a sustentabilidade dos sistemas produtivos no Cerrado.

2.3 Qualidade física do solo em sistemas agrícolas

2.3.1 Conceitos e evolução da qualidade do solo

O conceito de qualidade do solo passou por significativa evolução nas últimas décadas. Papa *et al.* (2011) e Ker (1997) destacam que a abordagem inicial, centrada exclusivamente na fertilidade química e na capacidade produtiva, foi progressivamente substituída por uma concepção mais integrada, que considera as múltiplas funções ecológicas do solo. Entre essas funções, os autores incluem a regulação do ciclo hidrológico, o armazenamento de carbono, o suporte à biodiversidade e a manutenção da estabilidade estrutural dos ecossistemas.

Essa concepção multidimensional, conforme enfatizado por Guimarães *et al.* (2014), fundamenta-se na interação entre atributos físicos, químicos e biológicos, os quais atuam de maneira interdependente para conferir resiliência ao sistema frente às pressões antrópicas. Papa

et al. (2011) e Guimarães *et al.* (2014) ressaltam que, no que tange à qualidade física do solo, esta desempenha papel fundamental na regulação de processos essenciais ao desenvolvimento vegetal, tais como a disponibilidade e o transporte de água, a aeração, a resistência mecânica à penetração radicular e a dinâmica da matéria orgânica.

Alterações estruturais que perturbam o equilíbrio entre as fases sólida, líquida e gasosa do solo podem comprometer a sustentabilidade produtiva, sendo especialmente relevantes em regiões tropicais sujeitas à intensificação do uso agrícola (Papa *et al.*, 2011; Guimarães *et al.*, 2014). Para mensurar essas alterações, Papa *et al.* (2011) e Guimarães *et al.* (2014) destacam que foram desenvolvidos indicadores capazes de sintetizar a complexidade dos processos edáficos, possibilitando a avaliação da degradação ou recuperação dos sistemas produtivos ao longo do tempo. Em áreas de Cerrado, a análise desses parâmetros no contexto da conversão de vegetação nativa em sistemas agrícolas auxilia na compreensão da dinâmica de transformação dos atributos do solo e subsidia a adoção de práticas de manejo sustentável.

Dessa forma, o estudo da qualidade do solo em Latossolos sob uso agrícola representa uma base teórica e prática essencial para interpretar as mudanças estruturais observadas. Ker (1997) e Papa *et al.* (2011) enfatizam que essa abordagem integra os processos pedogenéticos naturais às intervenções antrópicas, objetivando a manutenção da estabilidade e da resiliência dos sistemas edáficos nos ambientes tropicais

2.3.2 Principais indicadores de qualidade física do solo

A avaliação da qualidade física do solo em Latossolos cultivados no Cerrado utiliza indicadores quantitativos que refletem o estado estrutural e funcional do ambiente edáfico. Severiano *et al.* (2011b) e Pereira *et al.* (2010) destacam que esses indicadores permitem identificar alterações decorrentes do uso e manejo agrícola, bem como inferir sobre a capacidade do solo em sustentar o crescimento das plantas e o equilíbrio hídrico e aeróbico do perfil.

A densidade do solo, conforme definido por Severiano *et al.* (2013) e Schossler *et al.* (2018), expressa a relação entre a massa e o volume das partículas sólidas, sendo influenciada pela textura, pelo teor de matéria orgânica e pelo histórico de manejo. Severiano *et al.* (2013) observam que valores elevados de densidade indicam compactação, redução do espaço poroso e aumento da resistência à penetração radicular, limitando a infiltração de água e o desenvolvimento das culturas.

A resistência do solo à penetração, por sua vez, está diretamente relacionada à consistência do solo e ao seu teor de água. Cortez *et al.* (2010) e Farias *et al.* (2017) destacam que esse indicador é utilizado para detectar camadas compactadas que podem restringir o crescimento radicular, fornecendo subsídios complementares à densidade do solo para a interpretação do comportamento mecânico sob diferentes manejos e tempos de uso.

A porosidade do solo, conforme discutido por Severiano *et al.* (2011b) e Barbosa *et al.* (2022) engloba macroporos, microporos e porosidade total, determinando a capacidade de armazenamento e transporte de água, além da difusão de oxigênio na zona radicular. Barbosa *et al.* (2022) alertam que alterações no sistema poroso, causadas pela compactação ou pelo revolvimento, podem desequilibrar a aeração e a retenção hídrica, afetando processos fisiológicos e a atividade biológica do solo. O Intervalo Hídrico Ótimo, também denominado *Least Limiting Water Range* (LLWR), constitui um indicador integrador da qualidade física do solo. Leão (2019) e Souza *et al.* (2022) explicam que esse índice considera simultaneamente a disponibilidade de água, a aeração e a resistência mecânica, identificando a faixa de umidade em que as condições físicas são mais favoráveis ao crescimento radicular. Pereira *et al.* (2010) demonstram que este índice tem sido eficaz na avaliação de Latossolos sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado, permitindo compreender os efeitos do manejo agrícola sobre o equilíbrio físico-hídrico do solo ao longo do tempo.

Em síntese, a conjugação de indicadores como densidade do solo, resistência à penetração, atributos de porosidade e intervalo hídrico ótimo possibilita uma avaliação abrangente e consistente da qualidade física do solo. Severiano *et al.* (2011b) e Farias *et al.* (2017) ressaltam que essa abordagem fornece bases científicas para o diagnóstico de processos de degradação ou recuperação estrutural, subsidiando a adoção de práticas de manejo que promovam a sustentabilidade dos sistemas produtivos em ambientes agrícolas tropicais.

2.3.3 Sistema poroso: macroporos, microporos e porosidade total

O sistema poroso do solo constitui um componente essencial para o funcionamento físico-hídrico, influenciando a infiltração, a retenção e a redistribuição de água, além da difusão de gases e do crescimento radicular. Silva, S. *et al.* (2014) e Feitosa *et al.* (2020) destacam que, no contexto dos solos do Cerrado brasileiro, a estrutura porosa composta por macroporos e microporos desempenha papéis distintos e complementares. Silva, S. *et al.* (2014) explicam que os macroporos facilitam a condução rápida da água e a aeração do solo, além de promoverem

o crescimento radicular em profundidade, enquanto os microporos atuam no armazenamento da água disponível para as plantas, garantindo a umidade em períodos de déficit hídrico.

A manutenção do equilíbrio entre macroporosidade e microporosidade é crítica para o desempenho físico do solo, pois a alteração na distribuição desses poros pode comprometer tanto a aeração quanto a retenção hídrica. Farias *et al.* (2017) e Feitosa *et al.* (2020) demonstram que a compactação do solo, causada principalmente pelo tráfego intenso de máquinas agrícolas e pela redução da cobertura vegetal, promove a diminuição dos macroporos, influenciando negativamente a densidade do solo, a condutividade hidráulica e a penetração radicular, com consequente redução no crescimento e na produtividade das culturas.

Os Latossolos sob vegetação nativa no Cerrado apresentam elevada estabilidade estrutural, favorecendo a formação de um sistema poroso contínuo e funcional. Severiano *et al.* (2013) e Silva, S. *et al.* (2014) observam que essa estrutura é capaz de manter sua organização mesmo diante das variações sazonais de umidade. Severiano *et al.* (2013) alertam, no entanto, que o uso agrícola intensivo promove a degradação progressiva dessa estrutura, refletindo alterações cumulativas decorrentes das práticas de manejo, conforme observado em diferentes sistemas agrícolas implantados na região.

A análise da porosidade, incluindo a avaliação da macroporosidade e da microporosidade, constitui, portanto, ferramenta fundamental para a avaliação da qualidade física do solo e para a compreensão dos processos de degradação. Farias *et al.* (2017) e Pereira *et al.* (2018) ressaltam que essa análise fornece subsídios para a adoção de práticas conservacionistas no manejo agrícola do Cerrado. Veloso *et al.* (2024) complementam que o uso de funções de pedotransferência tem sido desenvolvido para estimar propriedades físicas do solo, como condutividade hidráulica e umidade em diferentes potenciais, o que é relevante para compreender o comportamento hidrológico em solos tropicais como os do Cerrado.

Portanto, a preservação e o manejo adequados do sistema poroso, promovendo a conservação da estrutura e da diversidade de poros, são imprescindíveis para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas na região do Cerrado. Silva, S. *et al.* (2014) e Feitosa *et al.* (2020) concluem que essas práticas asseguram o crescimento radicular eficiente e o armazenamento adequado de água para as culturas.

2.3.4 Compactação do solo: causas, consequências e valores críticos

A compactação do solo constitui um processo de degradação física de grande relevância em áreas agrícolas, especialmente em regiões tropicais como o Cerrado, onde a intensificação

do uso agrícola e a mecanização aumentaram significativamente nas últimas décadas. Feitosa *et al.* (2020) caracterizam esse processo pela redução do volume de poros e pelo aumento da densidade do solo devido à aplicação de cargas externas, decorrentes principalmente do tráfego de máquinas, do preparo excessivo, da ausência de cobertura vegetal e da realização de operações mecânicas em condições inadequadas de umidade.

No Cerrado, em Latossolos que apresentam estrutura granular natural e alta porosidade em condições preservadas, a repetida aplicação de esforço mecânico pode promover rearranjos estruturais, principalmente nas camadas subsuperficiais. Ngolo *et al.* (2023) e Severiano *et al.* (2013) destacam que esses rearranjos são agravados quando associados à baixa incorporação de resíduos orgânicos e à ausência de práticas conservacionistas. Feitosa *et al.* (2020) observam que esse processo leva à diminuição da macroporosidade, reduzindo a infiltração de água e aumentando a resistência mecânica do solo à penetração radicular, o que pode restringir o crescimento das raízes em profundidade e limitar o acesso das plantas à água e aos nutrientes disponíveis no perfil.

A compactação também pode causar o acúmulo superficial de água e intensificar a erosão, contribuindo para a degradação progressiva da qualidade do solo e para a redução da produtividade dos sistemas agrícolas ao longo do tempo (Sattolo *et al.*, 2021). Sattolo *et al.* (2021) ressaltam que a magnitude dos efeitos depende de fatores intrínsecos ao solo, como textura, estrutura e teor de matéria orgânica, bem como do histórico de uso e manejo adotado. Severiano *et al.* (2013) complementam que a suscetibilidade à compactação tende a aumentar com o aumento do teor de argila, que eleva a retenção de água e a porosidade total, mas também reduz a densidade do solo, facilitando a compactação sob cargas mecânicas.

Para o diagnóstico da compactação, utilizam-se indicadores físicos como a densidade do solo e a resistência à penetração, com a definição de valores críticos que indicam risco de restrição ao crescimento radicular. Sato *et al.* (2015) e Suzuki *et al.* (2022) demonstram que esses limites variam segundo a textura e a mineralogia do solo. Em solos argilosos do Cerrado, a resistência à penetração crítica para o crescimento radicular pode variar de 1,5 a 3,5 MPa, enquanto a densidade do solo crítica varia conforme a textura entre aproximadamente 1,32 e 1,66 Mg m⁻³. Esses valores, conforme destacado pelos autores, permitem orientar práticas de manejo para prevenção ou mitigação da compactação.

A compreensão integrada das alterações físicas e dos limites críticos favorece a formulação de estratégias de manejo sustentável. Feitosa *et al.* (2020), Sattolo *et al.* (2021) e Ngolo *et al.* (2023) destacam que tais estratégias incluem a manutenção da cobertura vegetal, a rotação e diversificação de culturas, o uso moderado e controlado da mecanização e a

incorporação de matéria orgânica. Essas práticas, segundo os autores, auxiliam na preservação da estrutura do solo e da qualidade física em Latossolos submetidos ao uso agrícola no Cerrado.

Dessa forma, o estudo da compactação considerando suas causas, seus impactos nas propriedades físicas do solo e a definição de valores críticos é fundamental para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas em ambientes tropicais como o Cerrado. Feitosa *et al.* (2020) e Sattolo *et al.* (2021) concluem que, nesse contexto, a integridade do sistema poroso do solo é crucial para o desempenho físico-hídrico e a produtividade das culturas.

2.4 Dinâmica do carbono orgânico e sua relação com a qualidade física

2.4.1 Carbono orgânico como agente estruturante em solos tropicais

O carbono orgânico do solo (COS) desempenha papel fundamental na formação e manutenção da estrutura dos solos tropicais, especialmente em ambientes intensamente intemperizados como o bioma Cerrado. Almeida e Sanches (2014) destacam que, nesses solos, onde predominam minerais de baixa atividade e com reduzida capacidade de troca catiônica, a matéria orgânica assume importância crítica como agente cimentante, promovendo a estabilização dos agregados e aumentando a coesão entre as partículas minerais.

Os compostos orgânicos, como as substâncias húmicas e os polissacarídeos produzidos pela atividade microbiana, atuam como ligantes naturais que promovem a agregação de partículas e a formação de um sistema poroso contínuo e funcional. Almeida e Sanches (2014) e Locatelli *et al.* (2022) explicam que esse efeito estrutural do COS está associado a melhorias na infiltração e retenção de água, maior difusão de gases no solo e redução da suscetibilidade à compactação, além de contribuir para a friabilidade do solo, o que facilita o crescimento radicular e o desenvolvimento das culturas nos sistemas agrícolas.

Na dinâmica natural do Cerrado, a cobertura vegetal nativa e a intensa atividade biológica sustentam um equilíbrio entre o acúmulo e a estabilidade da matéria orgânica, mantendo os estoques de COS e a qualidade estrutural do solo. Almeida e Sanches (2014) e Machado *et al.* (2026) alertam, no entanto, que a conversão dessas áreas para uso agrícola acarreta redução desses estoques, devido à remoção da vegetação original, à mobilização do solo e à menor reposição de resíduos vegetais, o que pode levar à instabilidade dos agregados e à maior vulnerabilidade do solo à degradação física.

Práticas conservacionistas, como o plantio direto e a diversificação de culturas, têm demonstrado potencial para conservar ou até incrementar os teores de carbono orgânico no solo. Pinto *et al.* (2021a) evidenciam que essas práticas contribuem para a melhoria da qualidade física e para o aumento da resiliência dos sistemas produtivos em ambientes tropicais. Os autores observam que o manejo que favorece a manutenção do COS está relacionado à maior formação de agregados estáveis e ao aumento dos índices de porosidade e capacidade de retenção de água, corroborando para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas no Cerrado.

Além disso, estudos indicam que diferentes frações do COS total, particulada, húmica e mineral-associada influenciam diretamente a estabilidade estrutural e a resistência do solo. Marinho Junior *et al.* (2021) e Locatelli *et al.* (2022) destacam que a qualidade do carbono orgânico constitui um fator determinante no comportamento físico do solo em áreas sob diferentes usos e manejos, incluindo áreas agrícolas, pastagens e vegetação nativa.

Assim, o carbono orgânico é mais que um indicador de fertilidade química e biológica; ele é elemento-chave na regulação dos processos físicos que determinam a funcionalidade estrutural do solo. Almeida e Sanches (2014) e Alves *et al.* (2016) enfatizam que a compreensão do papel do COS como agente estruturante em Latossolos do Cerrado sob diferentes períodos de uso agrícola é essencial para integrar a dinâmica da matéria orgânica à evolução da qualidade física do solo, orientando práticas de manejo sustentáveis que preservem a produtividade e a saúde do solo a longo prazo.

2.4.2 Relação carbono-agregação em Latossolos

A relação entre os teores de carbono orgânico e a agregação do solo constitui um dos principais mecanismos responsáveis pela organização estrutural dos Latossolos em ambientes tropicais. Machado *et al.* (2026) destaca que, no bioma Cerrado, onde a elevada intemperização dos solos resulta em predominância de minerais de baixa atividade, há forte dependência da matéria orgânica para a estabilização estrutural. Gualberto *et al.* (2023) complementa que o carbono orgânico atua como agente integrador, promovendo a coesão entre as partículas minerais e biológicas e viabilizando a formação de agregados estáveis por meio de interações físico-químicas e biológicas complexas.

As substâncias húmicas, os exsudatos radiculares, as raízes em decomposição e os metabólitos microbianos funcionam como agentes cimentantes naturais que fortalecem a estrutura granular do solo (Brito *et al.*, 2019). Machado *et al.* (2026) acrescenta que a estabilização dos agregados é ainda reforçada pela presença dos óxidos de ferro e alumínio, os

quais, em sinergia com a matéria orgânica, formam complexos organominerais que aumentam a coesão estrutural.

A estabilidade dos agregados, conforme evidenciado por Gualberto *et al.* (2023) e Rahman *et al.* (2023), está diretamente correlacionada com a qualidade e a quantidade do carbono orgânico disponível, sendo fortemente influenciada pelo manejo do solo, pela intensidade do revolvimento e pela adição de resíduos vegetais. Gualberto *et al.* (2023) observam que, em sistemas agrícolas conservacionistas, a manutenção da cobertura do solo e a diversificação de culturas promovem incrementos nos teores de carbono orgânico, favorecendo a recuperação gradual da estrutura e a estabilidade dos agregados, o que se reflete em melhorias na porosidade, na infiltração e na resistência mecânica do solo.

Por outro lado, a conversão de áreas nativas para sistemas agrícolas pode reduzir os estoques de carbono e comprometer a agregação. Saravia-Maldonado *et al.* (2024) alerta que esse processo aumenta a suscetibilidade do solo à compactação e à degradação física ao longo do tempo. Gualberto *et al.* (2023) e Machado *et al.* (2026) ressaltam que o estudo integrado da relação carbono-agregação permite compreender a dinâmica estrutural dos Latossolos sob diferentes histórias de uso, auxiliando na interpretação das transformações físicas observadas e na proposição de práticas sustentáveis de manejo para conservação estrutural e sustentabilidade dos sistemas produtivos tropicais.

Essas evidências, conforme destacado por Gualberto *et al.* (2023) e Valencia *et al.* (2025), evidenciam a importância do carbono orgânico do solo como elemento-chave para a estabilidade física e a funcionalidade dos Latossolos tropicais no Cerrado, fundamentando a adoção de práticas que promovam o aumento e a manutenção do carbono orgânico para garantir a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2.4.3 Alterações nos teores de carbono ao longo do tempo de cultivo

A conversão de áreas de vegetação nativa para uso agrícola no Cerrado promove alterações significativas na dinâmica do carbono orgânico do solo (COS), com impacto direto sobre a qualidade física e estrutural dos Latossolos cultivados. Machado *et al.* (2026) explica que, inicialmente, há redução dos estoques de carbono devido à remoção da cobertura vegetal original, ao revolvimento do solo e ao aumento da oxidação da matéria orgânica, resultando em maior exposição do solo às condições climáticas adversas e menor adição de resíduos vegetais. Siqueira-Neto *et al.* (2020) e Locatelli *et al.* (2022) complementam que essa perda inicial é acentuada especialmente em sistemas convencionais com preparo frequente e baixa

permanência de resíduos na superfície, favorecendo a degradação estrutural e a compactação do solo.

Por outro lado, práticas conservacionistas têm demonstrado potencial para mitigar essas perdas. Siqueira-Neto *et al.* (2020), Freitas *et al.* (2023) e Soares *et al.* (2024) evidenciam que o plantio direto, a rotação de culturas e os sistemas integrados de produção (agroflorestais, integração lavoura-pecuária) podem promover a recuperação parcial ou o incremento gradual do carbono orgânico, sobretudo nas camadas superficiais do solo, melhorando a estabilidade dos agregados, a porosidade e a resistência mecânica. Brito *et al.* (2019) ressalta que a dinâmica temporal do carbono está fortemente condicionada ao manejo adotado e às interações com o desenvolvimento radicular, a incorporação de resíduos e a atividade microbiana.

Cronossequências agrícolas, conforme demonstrado por Locatelli *et al.* (2022) e Machado *et al.* (2026) evidenciam que sistemas com maior tempo de adoção de práticas conservacionistas apresentam tendência à estabilização ou recuperação dos teores de carbono, refletindo-se em melhor qualidade física e funcional do solo. Locatelli *et al.* (2022) enfatiza que o monitoramento do COS ao longo do tempo constitui, portanto, ferramenta essencial para compreender e avaliar a evolução dos solos agrícolas no Cerrado, auxiliando na integração entre sustentabilidade produtiva e conservação ambiental.

Além disso, a redução do carbono orgânico provoca diminuição da agregação e da porosidade, e aumento da compactação, limitando a penetração radicular e o desempenho das culturas. Coutinho *et al.* (2014), Siqueira-Neto *et al.* (2020) e Locatelli *et al.* (2022) concluem que a análise dos estoques e da dinâmica do carbono ao longo das cronossequências agrícolas contribui para interpretar os processos de transformação estrutural em Latossolos cultivados e estabelecer relações entre tempo de uso, manejo e funcionalidade física do solo, fornecendo base científica para recomendações de manejo sustentável em ambientes tropicais.

2.5 Sistemas conservacionistas e cronossequência agrícola no Cerrado

2.5.1 Evolução dos sistemas de manejo

A evolução dos sistemas de manejo do solo no Cerrado tem evidenciado uma clara transição do preparo convencional para práticas conservacionistas, especialmente o plantio direto e os sistemas integrados de produção, com impactos significativos na qualidade física dos Latossolos. Feitosa *et al.* (2020) e Lobato *et al.* (2017) destacam que o preparo convencional, caracterizado pelo revolvimento intenso do solo, promove a degradação

estrutural progressiva, a redução do carbono orgânico e a maior suscetibilidade à compactação e à erosão.

Em contraste, o plantio direto, amplamente difundido na região, tem demonstrado benefícios expressivos para a qualidade física do solo. Valpassos *et al.* (2001) e Torres *et al.* (2019) evidenciam que esse sistema melhora a estabilidade estrutural, protege o solo contra o impacto direto das chuvas e estimula a atividade biológica, resultando em aumento do carbono orgânico, melhoria do sistema poroso e da infiltração de água, além de proporcionar maior resistência mecânica à penetração radicular em condições adequadas de manejo.

Os sistemas integrados, como a integração lavoura-pecuária (ILP) e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), têm se consolidado como estratégias promissoras para a intensificação sustentável do uso da terra. Marchão *et al.* (2009) observam que esses sistemas promovem maior ciclagem de nutrientes, aumento da adição de resíduos orgânicos e melhoria das condições físicas e biológicas do solo. Os autores ressaltam que a diversidade funcional das espécies vegetais contribui para a formação de estruturas biogênicas e para a recuperação de camadas compactadas ao longo do tempo.

Estudos realizados no Cerrado, conforme demonstrado por Lobato *et al.* (2017) e Pinto *et al.* (2021b), evidenciam que a implantação do plantio direto por períodos mais longos está associada a melhores atributos físicos do solo, como menor densidade, maior porosidade e maior estabilidade de agregados, quando comparado ao preparo convencional. Lobato *et al.* (2017) enfatizam que o tempo de implantação é crucial para que efeitos expressivos sejam observados. Carvalho *et al.* (2009; 2014) complementam que práticas conservacionistas mantêm ou aumentam os teores de carbono orgânico total e suas frações lábeis, elementos essenciais para a melhoria da qualidade do solo e sua sustentabilidade a longo prazo.

No contexto de cronossequências agrícolas, a análise da evolução histórica dos sistemas de manejo permite relacionar as condições estruturais atuais dos solos cultivados aos impactos cumulativos das práticas adotadas. Feitosa *et al.* (2020) e Sattolo *et al.* (2021) destacam a importância da transição para manejos conservacionistas como estratégia fundamental para mitigar a degradação física dos Latossolos em uso intensivo.

Assim, o avanço no conhecimento científico e tecnológico sobre o manejo do solo no Cerrado tem fundamentado políticas e práticas que conciliam eficiência produtiva e conservação ambiental. Lobato *et al.* (2017) e Marchão *et al.* (2009) concluem que compreender essa trajetória evolutiva é imprescindível para avaliar e planejar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas na região.

2.5.2 Cronossequência como abordagem metodológica para estudos temporais

A cronossequência constitui uma metodologia eficaz e amplamente utilizada para avaliar processos de transformação ambiental ao longo do tempo, por meio da comparação espacial de áreas com diferentes tempos de uso sob condições similares de impacto ambiental. Resende *et al.* (2017) e Sattolo *et al.* (2021) destacam que, em estudos no bioma Cerrado, essa abordagem tem sido fundamental para investigar os efeitos da conversão da vegetação nativa para uso agrícola e da intensificação do manejo sobre atributos físicos, químicos e biológicos do solo, permitindo identificar tendências de degradação ou recuperação da qualidade do solo e avaliar a eficiência de práticas conservacionistas.

Análises baseadas em cronossequências no Cerrado têm permitido observar reduções significativas nos estoques de matéria orgânica do solo em áreas cultivadas em comparação ao Cerrado nativo. Vinhal-Freitas *et al.* (2013) e Trabaquini *et al.* (2017) evidenciam que essas perdas são crescentes e associadas ao tempo de uso agrícola. Kaschuk *et al.* (2010) observam que essas transformações são também evidenciadas por mudanças em parâmetros químicos e microbiológicos, como a diminuição do carbono orgânico total e da biomassa microbiana, refletindo o impacto negativo da intensificação produtiva sobre a qualidade do solo.

Do ponto de vista físico, a cronossequência auxilia na avaliação da evolução da estrutura do solo, incluindo a estabilidade de agregados, a organização do sistema poroso e a resistência mecânica, aspectos particularmente relevantes em Latossolos submetidos ao manejo agrícola intensivo no Cerrado. Trabaquini *et al.* (2017) e Sattolo *et al.* (2021) destacam que a comparação entre diferentes tempos de uso agrícola permite interpretar de forma integrada os processos pedogenéticos e as alterações funcionalmente importantes na qualidade do solo, considerando também os efeitos mitigadores de sistemas conservacionistas e práticas de manejo sustentável.

Ainda que poderosa, a aplicação da cronossequência requer rigor na seleção das áreas amostrais. Sattolo *et al.* (2021) ressalta que é necessário considerar critérios como uniformidade textural, posição no relevo e histórico de manejo, para minimizar interferências de variabilidade espacial que não estejam relacionadas ao fator tempo, garantindo a confiabilidade das inferências sobre processos temporais.

Portanto, a cronossequência constitui ferramenta valiosa na ciência do solo para a integração de análises espaciais e temporais. Resende *et al.* (2017) e Trabaquini *et al.* (2017) concluem que essa abordagem facilita a compreensão dos impactos do uso agrícola ao longo

do tempo na funcionalidade estrutural dos solos e na sustentabilidade dos sistemas produtivos do Cerrado.

Os principais fatores que influenciam a variabilidade espacial em estudos de cronossequência incluem: i) relevo e topografia - Temme e Lange (2014) e Masseroli *et al.* (2022) explicam que a forma do terreno e suas variações influenciam a distribuição da água, dos sedimentos e dos nutrientes, afetando a formação e a evolução dos solos, podendo mascarar o efeito isolado do tempo na cronossequência; ii) material de origem (rocha-mãe) - Stevens e Walker (1970) e Masseroli *et al.* (2022) destacam que a composição e as propriedades do material de origem condicionam as características iniciais do solo e seu desenvolvimento pedogenético, podendo gerar heterogeneidade mesmo em áreas aparentemente semelhantes quanto à idade; iii) histórico geomorfológico - Temme e Lange (2014) e Masseroli *et al.* (2022) observam que os eventos geológicos e a dinâmica do relevo, como erosão, deposição e outras perturbações, desempenham papel importante na variabilidade espacial do solo, podendo modificar propriedades e evolução para além da simples cronologia temporal; vegetação e uso da terra - Mapelli *et al.* (2018) ressalta que diferenças na cobertura vegetal, no tipo de uso e no manejo do solo afetam a entrada de matéria orgânica e os processos biológicos, alterando propriedades químicas e físicas, o que amplia a variabilidade espacial; iv) clima local - Sauer (2015) explica que variabilidades em temperatura, precipitação e regimes sazonais impactam a oxidação da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e os processos químicos e biológicos do solo; e v) interações complexas e retroalimentações - Sauer (2015) e Shepard *et al.* (2016) destacam que o desenvolvimento dos solos depende da interação entre múltiplos fatores formadores, e sua variabilidade pode ser influenciada por processos dinâmicos e que não se limitam à simples progressão temporal.

Em resumo, embora o tempo seja uma variável central em uma cronossequência, a variabilidade espacial em estudos do solo reflete a combinação complexa de fatores ambientais, geomorfológicos, biológicos e históricos que interagem na formação e evolução dos solos. Temme e Lange (2014), Sauer (2015) e Masseroli *et al.* (2022) concluem que essa complexidade exige cuidadosa seleção de áreas e considerações metodológicas para o correto uso e interpretação dessa abordagem.

2.5.3 Efeitos do tempo de uso agrícola sobre os atributos físicos

O tempo de uso agrícola constitui um fator determinante nas transformações dos atributos físicos do solo em ambientes tropicais, como os Latossolos do Cerrado, especialmente

em contextos de intensificação produtiva. Feitosa *et al.* (2020), Farias *et al.* (2017) e Locatelli *et al.* (2022) demonstram que a conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas promove mudanças progressivas na estrutura do solo, inicialmente nas camadas superficiais e, com o aumento do tempo e da intensidade do manejo, alcançando camadas mais profundas.

Entre as principais modificações observadas, destacam-se o aumento da densidade do solo, a redução da macroporosidade e o incremento da resistência mecânica à penetração radicular, processos que resultam do rearranjo das partículas sólidas e da diminuição da estabilidade estrutural (Farias *et al.*, 2017; Feitosa *et al.*, 2020; Locatelli *et al.*, 2022). Bobul'Ská *et al.* (2021) e Locatelli *et al.* (2022) complementam que essas alterações estão frequentemente associadas à redução dos teores de matéria orgânica essencial para a estabilidade dos agregados e manutenção da porosidade e à menor diversidade e atividade radicular resultante dos sistemas agrícolas adotados, fatores que limitam a infiltração e o armazenamento de água e restringem o crescimento radicular e a atividade biológica no solo.

Estudos em cronossequências no Cerrado, conforme evidenciado por Sattolo *et al.* (2021) e Silva, S. *et al.* (2014), mostram que áreas com menor tempo de uso agrícola preservam mais adequadamente as características estruturais herdadas da vegetação nativa, enquanto áreas cultivadas por mais longo prazo, especialmente sob práticas intensivas, apresentam sinais evidentes de degradação física. A magnitude das alterações físicas, conforme destacado por Severiano *et al.* (2013) e Trabaquini *et al.* (2017), varia segundo as propriedades intrínsecas do solo, como textura e suscetibilidade à compactação, e o histórico de manejo adotado. Severiano *et al.* (2013) observam que sistemas que promovem maior aporte de resíduos orgânicos e menor revolvimento tendem a atenuar os efeitos negativos, preservando melhor a funcionalidade física do solo.

Em resumo, a análise temporal das mudanças estruturais permite identificar limites críticos de uso e subsidiar estratégias de manejo mais sustentáveis. Silva, S. *et al.* (2014) e Locatelli *et al.* (2022) concluem que essa abordagem é fundamental para promover a conservação do solo e a sustentabilidade dos sistemas produtivos tropicais.

2.5.4 Mitigação da degradação física via sistemas conservacionistas

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária, tem se mostrado eficaz na mitigação da degradação física do solo em ambientes agrícolas do Cerrado. Guareschi; Pereira e Perin (2012) e Welldy *et al.* (2016) destacam que esses sistemas promovem a redução do revolvimento mecânico, a manutenção da

cobertura vegetal e a diversificação das espécies cultivadas, condições que favorecem a melhoria gradual da estrutura e da funcionalidade do solo.

Essas práticas são fundamentais para o aumento da adição de resíduos orgânicos na superfície do solo, estimulando a formação e a estabilização de agregados, bem como promovendo maior atividade biológica que reorganiza o sistema poroso e auxilia na recuperação de camadas compactadas. Almeida e Sanches (2014) e Welldy *et al.* (2016) observam que, como resultado, ocorre melhoria na infiltração de água e na aeração do ambiente radicular, aspectos essenciais para a sustentabilidade e a produtividade agrícola.

Em termos de carbono orgânico, Bayer *et al.* (2006) e Carvalho *et al.* (2009) demonstram que o plantio direto e os sistemas que minimizam o revolvimento do solo apresentam potencial para incrementar os estoques de carbono orgânico particulado, principalmente em solos com maior teor de argila, enquanto o carbono mineral-associado mostra-se menos afetado a curto prazo. Carvalho *et al.* (2009) ressalta que essa maior estabilidade e acúmulo contribuem para a conservação da qualidade do solo em uso contínuo.

Ainda que a diversificação e a rotação de culturas possam ampliar os benefícios, Sattolo *et al.* (2021) alertam que a intensidade das operações mecanizadas também influencia os atributos físicos do solo, podendo levar à degradação quando não controlada, evidenciando a necessidade de manejo integrado e monitoramento contínuo desses sistemas.

Assim, a integração dos sistemas conservacionistas com práticas adequadas de manejo do solo constitui uma base científica sólida para conciliar a intensificação produtiva com a conservação dos recursos edáficos no Cerrado. Guareschi; Pereira e Perin (2012) e Welldy *et al.* (2016) concluem que essa abordagem promove a sustentabilidade e a resiliência dos agroecossistemas tropicais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e área de estudo

O estudo foi realizado em área comercial de produção de *commodities* inserida no bioma Cerrado, localizada no município de Sebastião Leal (07°40'44" S, 44°04'16" O), ao sudoeste do estado do Piauí, Nordeste brasileiro (Figura 1). De acordo com a classificação climática de Köppen, essa área apresenta clima do tipo tropical de savana (Aw), caracterizado por temperaturas elevadas durante todo o ano e uma marcada sazonalidade na distribuição das chuvas, com temperaturas médias anuais que superam os 25 °C (Alvares *et al.*, 2013). A área de estudo está a 445 m de altitude e de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos, H. *et al.*, 2018), possui solo classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, que é equivalente a *Typic Hapludox* e *Dystric Ferralsol* de acordo com o sistema de classificação de solos dos Estados Unidos (Soil Survey Staff, 2022) e o sistema internacional de classificação de solos da FAO (IUSS Working Group WRB, 2022), respectivamente.

O estudo foi conduzido em uma cronosequência, baseada na disponibilidade de áreas com diferentes tempos de cultivo sob manejo conservacionista. Foram selecionadas três áreas cultivadas consecutivamente por 12, 18 e 24 anos, além de uma área adjacente sob vegetação nativa de Cerrado, utilizada como referência das condições naturais do solo (Figura 1).

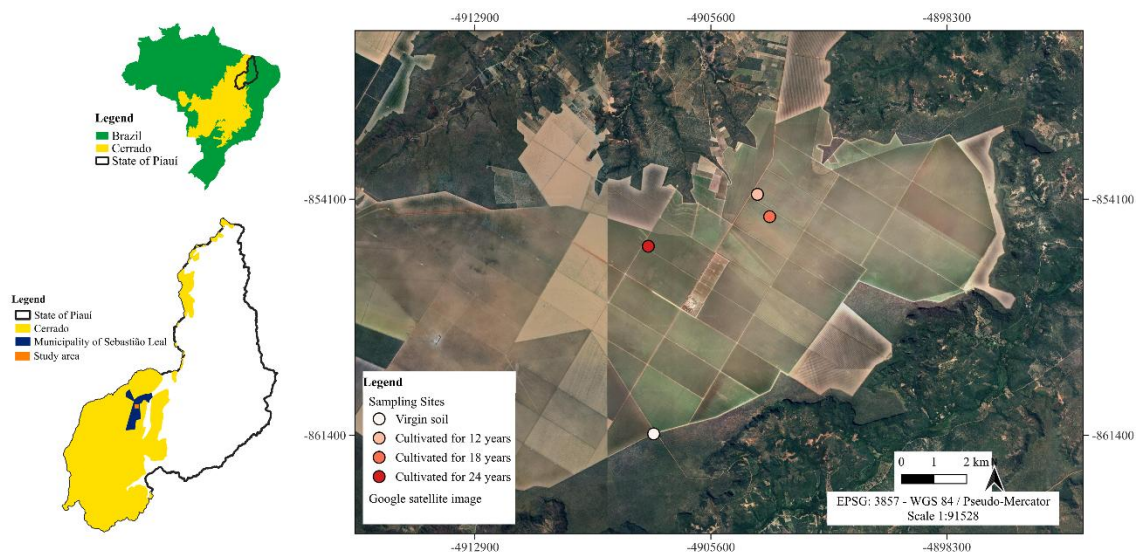


Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Sebastião Leal, sudoeste do Piauí, Brasil, com indicação dos quatro pontos de amostragem: vegetação nativa de Cerrado e áreas com 12, 18 e 24 anos de cultivo mínimo.

A escolha desses períodos baseou-se na possibilidade de representar diferentes estágios de consolidação do manejo agrícola na região, abrangendo desde áreas mais recentemente convertidas até aquelas com longo histórico de uso, permitindo assim avaliar o efeito do tempo de adoção do cultivo mínimo sobre os atributos físicos do solo.

3.2 Caracterização e históricos das áreas estudadas

Em média, nos primeiros 0.5 m de profundidade dos locais estudados, os valores de areia variam de 636 a 706 g kg^{-1} , enquanto os valores de silte e argila variam de 29 a 42 g kg^{-1} e 253 a 335 g kg^{-1} , respectivamente (Figura 2), como determinado pelo método da pipeta (Gee e Bauder, 1986). Os teores médios de goethita (Gt) variam entre 64,2 e 70,1 g kg^{-1} , enquanto os teores de hematita (Hm) variam entre 50,1 e 53,4 g kg^{-1} (Figura 2), utilizando espectroscopia de refletância seguindo o método proposto por Fernandes *et al.* (2004) (Figura 3). O método consiste na estimativa de óxidos a partir de curvas espectrais na região do visível, entre 420 e 450 nm para Gt e entre 530 e 570 nm para Hm, após procedimento da segunda derivada da função Kubelka-Munk. Para isso, as amostras foram escaneadas com o sensor Nix Spectro 2TM, equipado com um adaptador plano transparente, para garantir o padrão de medida, com leituras realizadas na faixa de 400 a 700 nm. Em seguida, os dados espectrais foram submetidos a normalização min-max, obedecendo a escala de 0 a 1, visando reduzir diferenças de magnitude entre as amostras, sem alterar o formato dos espectros.

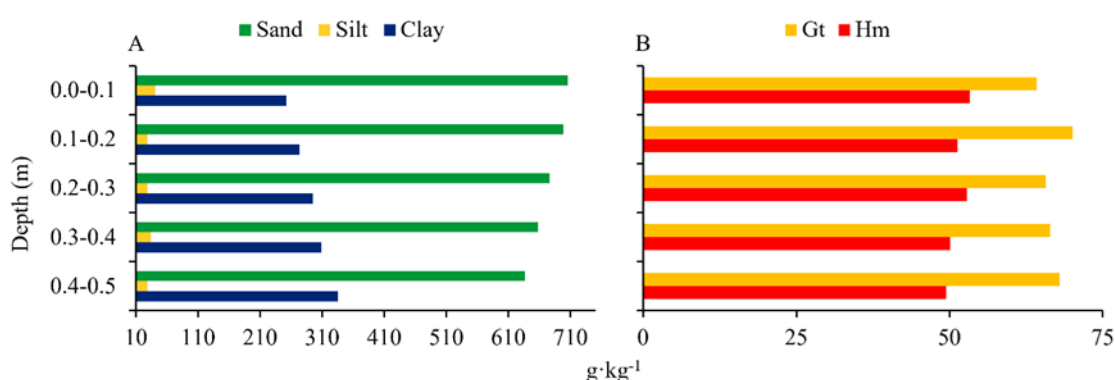


Figura 2 - Valores médios (n=3) das frações granulométricas (areia, silte e argila) em g kg^{-1} (A) e teores de óxidos de ferro (goethita e hematita) em g kg^{-1} (B) em Latossolo Amarelo Distrófico sob diferentes tempos de cultivo (12, 18 e 24 anos) e vegetação nativa, amostrado em camadas de 0.1 m até 0.5 m de profundidade.

O procedimento de normalização é uma prática comum e considerada importante dentro da espectroscopia de solos (Stenberg *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 2014). Em seguida, os valores normalizados de reflectância foram transformados em unidades Kubelka-Munk, acompanhado

do cálculo da segunda derivada da função Kubelka–Munk em relação ao comprimento de onda, utilizando o método de diferenças finitas ($\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$), com o objetivo de realçar características espectrais e evidenciar bandas de absorção (Figura 3). Os valores das amplitudes nas regiões espectrais de interesse foram aplicados aos modelos propostos por Fernandes *et al.* (2004) para TFSA, tendo como produto as concentrações estimadas de de Gt e Hm em g kg^{-1} .

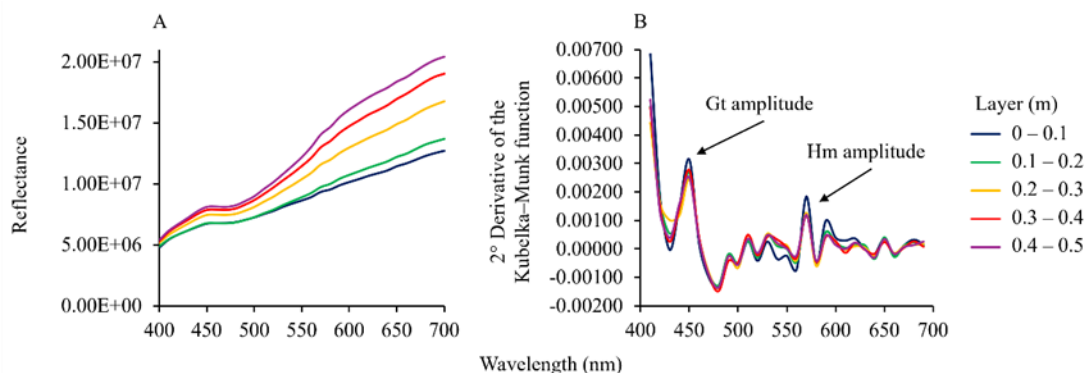


Figura 3 - Espectros de reflectância média por camada de solo (0-0,5 m) obtidos com sensor Nix Spectro 2™: (A) espectros brutos e (B) espectros após processamento e normalização para estimativa de óxidos de ferro. Valores médios ($n=3$) das frações granulométricas (areia, silte e argila) em g kg^{-1} (A) e teores de óxidos de ferro (goethita e hematita) em g kg^{-1} (B) em Latossolo Amarelo Distrófico sob diferentes tempos de cultivo (12, 18 e 24 anos) e vegetação nativa, amostrado em camadas de 0.1 m até 0.5 m de profundidade.

Os valores são apresentados de forma agregada porque a granulometria e os teores de óxidos de ferro são atributos estáveis do solo, derivados do material de origem e pouco alterados pelo manejo em escala de décadas (Tabela 1). O objetivo foi caracterizar a homogeneidade da área quanto a esses atributos de fundo, e não os comparar entre os diferentes tempos de uso, permitindo assim isolar os efeitos do manejo sobre os indicadores físicos mais dinâmicos.

Tabela 1 - Histórico de manejo das áreas cultivadas com 12, 18 e 24 anos de adoção de cultivo mínimo em Latossolo Amarelo no Cerrado do Piauí.

Safra	Vegetação nativa	12 anos	18 anos	24 anos
Condição inicial	Sem sinais de antropização	Supressão em 2010	Supressão em 2004	Supressão em 1998
1998/99	—	—	—	Calagem; preparo convencional; arroz + P_2O_5 (linha), K_2O (lanço), N baixo
1999/00	—	—	—	Calagem; escarificação; arroz + P_2O_5 , K_2O , N alto
2000/01	—	—	—	Soja + P_2O_5 , K_2O , N baixo
2001/02	—	—	—	Gessagem; soja + P_2O_5 , K_2O , N baixo
2002/03	—	—	—	Calagem + gesso; soja + P_2O_5 , K_2O

Safra	Vegetação nativa	12 anos	18 anos	24 anos
2003/04	—	—	—	Soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2004/05	—	—	Supressão; calagem; arroz + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N médio	Gessagem; soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2005/06	—	—	Calagem; escarificação; soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2006/07	—	—	Calagem; soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Gessagem; soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2007/08	—	—	Soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Gessagem; algodão + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N alto
2008/09	—	—	Calagem + gesso; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem + gesso; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2009/10	—	—	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2010/11	—	Supressão; calagem; milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem + gesso; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2011/12	—	Calagem; escarificação; soja + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2012/13	—	Gessagem; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N alto	Gessagem; soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2013/14	—	Milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N alto	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2014/15	—	Soja–milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N alto	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2015/16	—	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N alto	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N baixo
2016/17	—	Milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅	Soja–milheto (GN) sem adubação
2017/18	—	Soja–milheto (GN) + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N alto	Soja–milheto (GN) sem adubação	Soja–milheto (GN) sem adubação
2018/19	—	Soja–milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Soja–milheto (GN) + K ₂ O	Soja; escarificação; milheto (ESC) + K ₂ O
2019/20	—	Soja–milho + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem + gesso; escarificação; soja–milheto (ESC) + P ₂ O ₅ , K ₂ O	Calagem; soja–milheto (SM) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2020/21	—	Soja–milheto (SM) + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N baixo	Soja–milheto (SM) + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N baixo	Soja–milheto (SM) + P ₂ O ₅ , K ₂ O, N baixo
2021/22	—	Gessagem; soja–milho + K ₂ O	Soja–milho + K ₂ O	Gessagem; soja–milheto (SM) + P ₂ O ₅ , K ₂ O
2022	Coletas	Coletas	Coletas	Coletas

GN = milheto sob preparo com grade niveladora, ESC = milheto após escarificação SM= milheto sob semeadura mecanizada direta

3.3 Delineamento experimental

A amostragem do solo foi realizada em setembro de 2022, com coleta de amostras deformadas e indeformadas, em camadas de 0.1 m desde a superfície até 0.5 m de profundidade. As amostras deformadas foram retiradas com o auxílio de uma pá de jardinagem feita em aço inoxidável, enquanto as amostras indeformadas foram coletadas com anel tipo Kopeck e na forma de torrões que tinham aproximadamente 30 cm de diâmetro, foram acondicionados em recipientes rígidos para preservar sua integridade estrutural durante o transporte e manuseio (Figura 4).

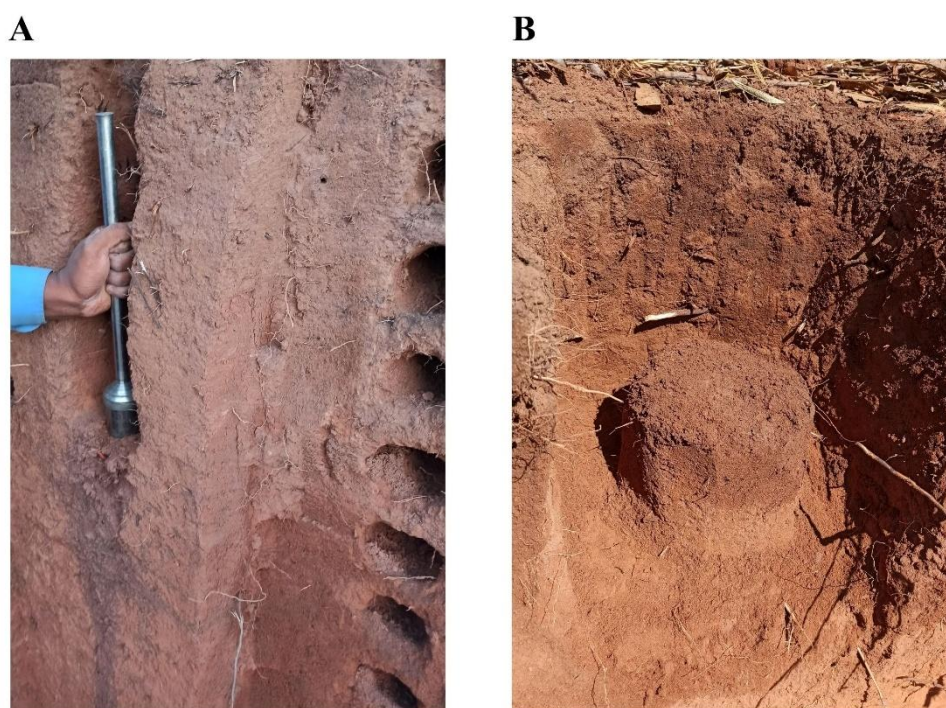


Figura 4 - Procedimentos de coleta de amostras indeformadas em campo: (A) coleta com anel volumétrico tipo Kopeck (100 cm³) para determinação de densidade, porosidade e resistência à penetração; (B) coleta de torrões (≈ 30 cm diâmetro) para análises de estabilidade de agregados.

Nos locais cultivados, as amostras foram retiradas em paralelo a linha de plantio, a distância aproximada de 0.05 m. Em todos os locais, as coletas foram retiradas em triplicatas, respeitando a distância mínima de 0.5 m entre cada uma. Todo o processo de amostragem obedeceu aos direcionamentos do manual de descrição e coleta de solo no campo da sociedade brasileira de ciência do solo (Santos *et al.*, 2015).

Após a coleta, os torrões foram cuidadosamente envolvidos em papel filme e acondicionados em caixas plásticas rígidas, devidamente identificadas, para preservar sua estrutura original durante o transporte até o laboratório. As amostras coletadas com anel

volumétrico foram seladas com tampas e envolvidas em sacos plásticos individuais, visando evitar perda de umidade e deformações. Todas as amostras foram transportadas em posição vertical e mantidas em temperatura ambiente até o momento das análises.

As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de abertura de 2 mm para compor a fração Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Essa fração foi utilizada para obtenção dos valores de granulometria do solo, óxidos de ferro e carbono orgânico total (COT). As amostras indeformadas coletadas com os anéis volumétricos foram utilizadas para obtenção dos valores de macroporosidade (MAC), microporosidade (MIC), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), capacidade de campo (CC), capacidade de aeração (CA) e água disponível (AD), resistência do solo a penetração (RP) foi realizada em campo, o solo foi umedecido até atingir a capacidade de campo. Já os torrões foram utilizados para as análises de agregados estáveis em água (DMP), percentual de agregados estáveis (AEA) e distribuição de percentual das frações dos agregados (PFA).

3.4 Variáveis analisadas

3.4.1 Carbono orgânico total

O COT foi determinado pelo método colorimétrico de Walkley-Black modificado, conforme Yeomans e Bremner (1988), no qual o carbono é oxidado por dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido, com quantificação por leitura espectrofotométrica.

3.4.2 Porosidade do solo

A PT foi obtida a partir da relação entre o peso saturado da amostra e o peso seco em estufa a 105 °C pelo volume do cilindro, como sugerido por Teixeira *et al.* (2017). A determinação de MAC foi realizada pelo volume de água drenado após o equilíbrio das amostras saturadas sob a tensão de 6 kPa, aplicada em câmara de Richards (Richards, 1949). Os valores de MIC foram obtidos pela diferença entre o peso das amostras sob tensão de 6 kPa e o peso seco em estufa a 105 °C, sendo este valor dividido pelo volume do cilindro, correspondendo ao volume de água retido em poros de diâmetro inferior a 0.05 mm.

3.4.3 Densidade do solo

A determinação de DS foi realizada seguindo as recomendações de Teixeira *et al.* (2017) após secagem dos anéis volumétricos em estufa a 105 °C. A densidade foi calculada pela razão entre a massa seca e o volume do anel volumétrico.

3.4.4 Resistencia do solo a penetração

A RP foi determinada usando o método de STOLF com penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 300 (Stolf, 2011).

3.4.5 Capacidade de campo

A capacidade de campo foi determinada em amostras de solo com estrutura indeformada previamente saturadas e submetidas à tensão matricial de -10 kPa em câmara de pressão de Richards equipada com placas porosas. Após o equilíbrio hidráulico, o teor de água retido no solo foi determinado gravimetricamente e expresso em base volumétrica, sendo considerado correspondente à capacidade de campo, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

3.4.6 Capacidade de aeração

A capacidade de ar do solo foi estimada a partir da curva de retenção de água, sendo calculada pela diferença entre a porosidade total do solo e o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (θ_{FC}), conforme proposto por Reynolds *et al.* (2009).

3.4.7 Água disponível

A AD foi determinada pela diferença entre o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (θ_{FC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PWP}), obtidos a partir da curva de retenção de água no solo, conforme metodologia descrita por Reynolds *et al.* (2009).

3.4.8 Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados em água foi determinada pelo método de tamisamento úmido, descritos em Zhao *et al.* (2017). Para isso, as amostras indeformadas coletadas na forma de torrões foram cuidadosamente quebradas em pontos de fraqueza e submetidas a peneiramento utilizando um conjunto de peneiras com abertura de 9,2 e 8,0 mm para remoção de raízes visíveis e macrofauna. Os agregados retidos na peneira de 8,0 mm foram então submetidos a secagem ao ar. Após a secagem, subfrações de 50 g de agregados foram pré-umedecidas por capilaridade por 1 minuto, e postas no topo do conjunto de peneiras com aberturas de 5,0, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, e submetidas ao agitador vertical de tamisamento úmido (Yoder), submersas em água destilada. O agitador foi operado com amplitude de 0,3 m e frequência de 30 ciclos min^{-1} , durante 30 minutos. Após o peneiramento, o material retido em cada peneira foi recolhido, seco em estufa a 60 °C até massa constante e pesado em recipientes de massa conhecida. A partir das massas obtidas, foram calculados o DMP, AEA e PFA.

3.4.9 S-index e SI

O índice S foi calculado a partir da equação de retenção de água proposta por van Genuchten (1980), ajustada aos dados da curva de retenção de água, conforme proposto por Dexter (2004). A equação de van Genuchten descreve a relação entre o conteúdo de água no solo (θ) e o potencial matricial (h), sendo expressa como uma função $\theta(h)$, cujos parâmetros refletem características da distribuição de poros e da estrutura do solo.

Nessa equação, $\theta(h)$ representa a umidade volumétrica em um dado potencial matricial; θ_s corresponde à umidade na saturação; θ_r à umidade residual; h ao potencial matricial; e α , n e m são parâmetros empíricos que definem o formato da curva de retenção, sendo comumente adotada a relação $m = 1 - 1/n$.

O índice S corresponde à inclinação da curva de retenção de água no ponto de inflexão e é obtido pela seguinte expressão:

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

Em que n e m são parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, θ_s é a umidade volumétrica na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e θ_r é a umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Valores de $S > 0,035$ indicam solos com boa qualidade estrutural; valores

entre 0,020 e 0,035 indicam qualidade moderada; e valores inferiores a 0,020 indicam solos com estrutura degradada (Dexter, 2004).

O índice de estabilidade estrutural (SI) foi determinado com base na relação entre o carbono orgânico total (COT) e a fração fina do solo (silte + argila), conforme metodologia descrita por Pieri (1992). O SI foi calculado pela razão entre o COT e a soma das frações silte e argila, multiplicada por 100 (Tabela 2).

Tabela 2 - Indicadores de qualidade do solo e respectivos limites críticos e faixas de classificação.

Indicador de Qualidade Física	Unidade	Faixas de Qualidade do Solo*		
		Muito Degradada	Degradação Moderada	Funcional / Não Degradada
Agregados estáveis em água	%	< 47,5	47,5	≥ 95
Diâmetro médio ponderado	mm	< 2,5	2,5	≥ 5,0
Água disponível	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	< 0,05	0,05	≥ 0,09
Microporosidade	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	< 0,24	0,24	≥ 0,48
Macroporosidade	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	< 0,05	0,05	≥ 0,10
Densidade do solo	g cm^{-3}	≥ 1,65	1,30	≤ 1,30
Índice de qualidade estrutural do solo	%	≤ 5	$5 < \text{SI} \leq 9$	> 9
S- Index		< 0,020	0,020–0,035	$S > 0,035$

* Os valores de referência para os indicadores Agregados estáveis em água, Diâmetro médio ponderado, Água disponível, Microporosidade, Macroporosidade e Densidade do solo foram baseados em Lima *et al.* (2013), sendo específicos para solos com teor de argila entre 20 e 40%. O índice de qualidade estrutural do solo foi baseado nos critérios estabelecidos por Pieri (1992). As faixas de interpretação para o Índice S-index seguem a proposta de Dexter (2004).

3.5 Análise estatística

Inicialmente, foram verificadas as suposições de normalidade e homogeneidade dos resíduos. A normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965), enquanto a homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene (Levene, 1960). Quando a suposição de normalidade não foi atendida ($p \leq 0,05$), aplicaram-se transformações logarítmica ou de raiz quadrada aos dados, conforme apropriado para COT, PT e AD.

Os dados foram analisados por meio de um modelo linear misto com o pacote lme4 (Bates *et al.*, 2015), considerando a estrutura hierárquica do delineamento experimental. O fator Local (quatro níveis: vegetação nativa, 12, 18 e 24 anos) e o fator Camada (cinco níveis: 0.0–0.1; 0.1–0.2; 0.2–0.3; 0.3–0.4; 0.4–0.5 m) foram considerados efeitos fixos, bem como a interação Local $\times$ Camada. Os pontos de amostragem foram incluídos como efeito aleatório, representando as unidades experimentais e permitindo modelar a dependência estrutural entre as camadas amostradas dentro de um mesmo ponto.

A adoção do modelo linear misto foi fundamentada na necessidade de tratar adequadamente a estrutura hierárquica dos dados, na qual múltiplas camadas (0.0–0.5 m) foram amostradas dentro de cada ponto de coleta, gerando observações não independentes. Essa abordagem é estatisticamente mais conservadora do que modelos que ignoram essa dependência, pois evita a pseudoreplicação que ocorreria se as camadas fossem tratadas como amostras independentes, o que poderia levar à superestimação dos graus de liberdade, à subestimação dos erros padrão e, conseqüentemente, à inflação da probabilidade de erro tipo I. Dessa forma, o uso do modelo misto assegura maior robustez inferencial e confiabilidade nas comparações realizadas.

Quando identificados efeitos significativos ($p \leq 0,05$) para fatores principais ou para a interação, procedeu-se ao desdobramento dos efeitos simples. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey (HSD – Honestly Significant Difference), ao nível de 5% de probabilidade, para controle do erro tipo I em múltiplas comparações.

Os resultados dos modelos foram expressos por meio dos valores de F, graus de liberdade e valores de p. Quando pertinente, o tamanho de efeito foi estimado por meio do eta quadrado parcial (η^2), como medida da magnitude dos efeitos observados. Esse procedimento foi aplicado aos indicadores de qualidade física do solo, incluindo diâmetro médio ponderado, agregados estáveis em água, percentual de agregados estáveis, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, resistência à penetração, capacidade de campo, capacidade de aeração, água disponível, S-index e carbono orgânico total (Figura 5). As matrizes gráficas foram elaboradas no software R (R CORE TEAM, 2023), utilizando o pacote *ggplot2* (Wickham, 2016). O nível de significância adotado em todas as análises foi de 5% ($p \leq 0,05$).

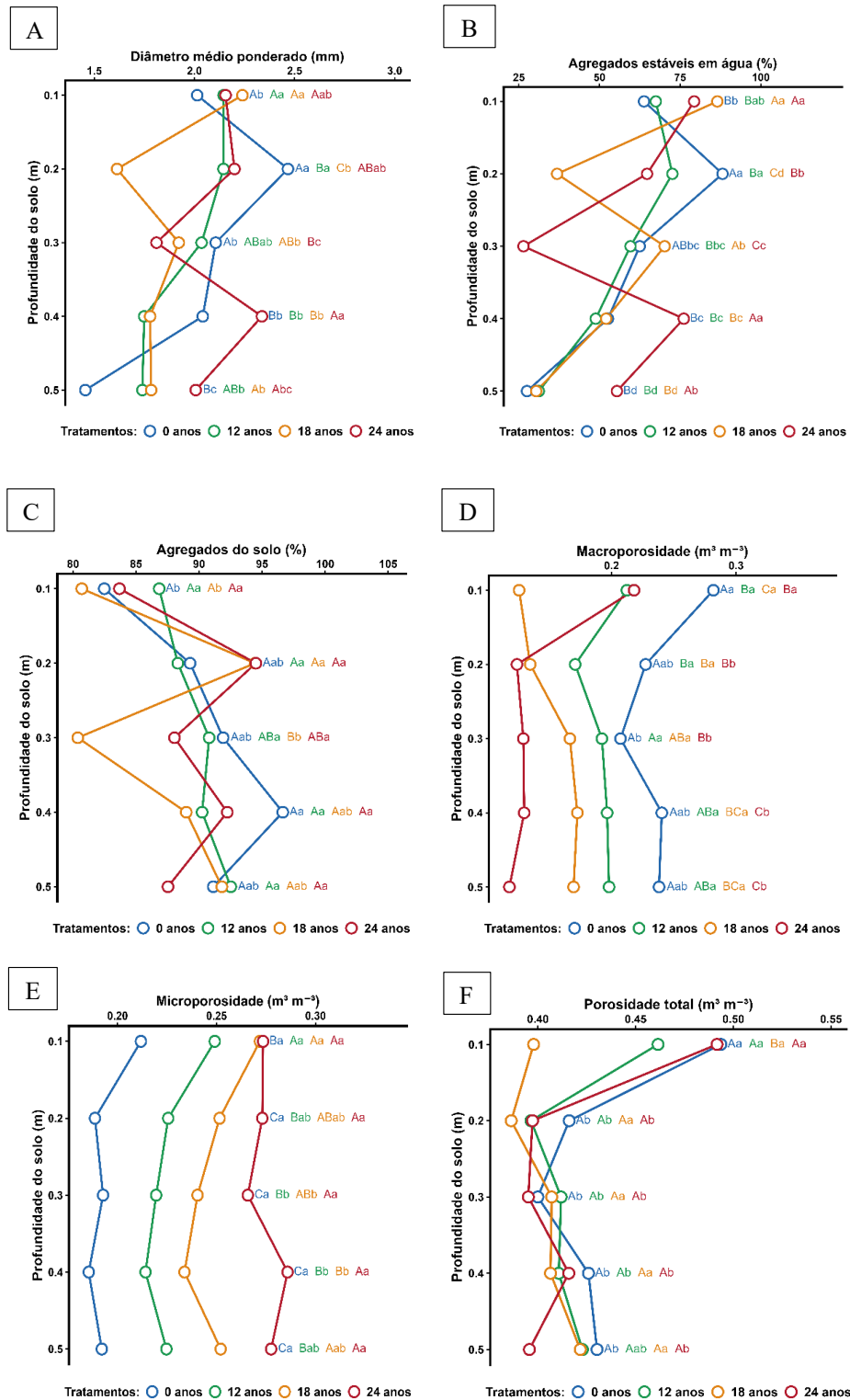


Figura 5 - Diâmetro médio ponderado, agregados estáveis em água, distribuição dos agregados, macroporosidade, microporosidade e porosidade total em diferentes camadas do solo (0.0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3, 0.3-0.4, 0.4-0.5 m) em áreas com 12, 18 e 24 anos de cultivo mínimo e vegetação nativa. Letras maiúsculas comparam as áreas dentro de cada camada do solo, enquanto letras minúsculas comparam as camadas dentro de cada área. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% significância ($p \leq 0,05$).

4 RESULTADOS

A estatística descritiva dos atributos físicos do solo nas diferentes profundidades está apresentada na Tabela 3. De modo geral, a RP e a MAC apresentaram os maiores coeficientes de variação (17.24–51.71% e 17.65–30.00%, respectivamente), enquanto a PT e a DS mostraram menor variabilidade (2.38–9.09% e 2.31–6.46%, respectivamente), indicando maior homogeneidade espacial desses atributos.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos físicos de um Latossolo Amarelo distrófico típico avaliado em cinco camadas (0.0–0.5 m) em áreas sob vegetação nativa e cultivo mínimo no município de Sebastião Leal, PI.

Atributos	Camadas (m)	Média $\pm$ SD	Amplitude	CV (%)
DMP (mm)	0.0–0.1	2.12 $\pm$ 0.09	2.01–2.24	4.25
	0.1–0.2	2.02 $\pm$ 0.36	1.61–2.47	17.82
	0.2–0.3	1.96 $\pm$ 0.13	1.81–2.11	6.63
	0.3–0.4	2.05 $\pm$ 0.27	1.75–2.34	13.17
	0.4–0.5	1.73 $\pm$ 0.23	1.45–2.01	13.29
AEA (%)	0.0–0.1	74.28 $\pm$ 3.97	63.79–86.52	5.34
	0.1–0.2	65.58 $\pm$ 4.70	36.84–88.14	7.17
	0.2–0.3	54.67 $\pm$ 3.61	26.42–70.19	6.60
	0.3–0.4	57.40 $\pm$ 3.94	48.81–76.13	6.87
	0.4–0.5	36.12 $\pm$ 5.50	27.51–55.39	15.23
MAC (m ³ m ⁻³)	0.0–0.1	0.20 $\pm$ 0.06	0.13–0.28	30.00
	0.1–0.2	0.18 $\pm$ 0.05	0.12–0.23	27.78
	0.2–0.3	0.17 $\pm$ 0.03	0.13–0.21	17.65
	0.3–0.4	0.18 $\pm$ 0.05	0.13–0.24	27.78
	0.4–0.5	0.18 $\pm$ 0.05	0.12–0.24	27.78
MIC (m ³ m ⁻³)	0.0–0.1	0.24 $\pm$ 0.03	0.21–0.27	12.50
	0.1–0.2	0.23 $\pm$ 0.04	0.19–0.27	17.39
	0.2–0.3	0.23 $\pm$ 0.03	0.19–0.27	13.04
	0.3–0.4	0.24 $\pm$ 0.04	0.19–0.29	16.67
	0.4–0.5	0.23 $\pm$ 0.04	0.19–0.28	17.39
PT (m ³ m ⁻³)	0.0–0.1	0.44 $\pm$ 0.04	0.40–0.49	9.09
	0.1–0.2	0.41 $\pm$ 0.01	0.39–0.42	2.44
	0.2–0.3	0.40 $\pm$ 0.01	0.40–0.41	2.50
	0.3–0.4	0.42 $\pm$ 0.01	0.41–0.43	2.38
	0.4–0.5	0.41 $\pm$ 0.02	0.40–0.43	4.88
DS (g cm ⁻³)	0.0–0.1	1.36 $\pm$ 0.09	1.27–1.54	6.46
	0.1–0.2	1.50 $\pm$ 0.09	1.45–1.55	5.72
	0.2–0.3	1.51 $\pm$ 0.03	1.42–1.57	2.31
	0.3–0.4	1.48 $\pm$ 0.05	1.40–1.54	3.65
	0.4–0.5	1.43 $\pm$ 0.07	1.37–1.50	4.59
RP (MPa)	0.0–0.1	1.02 $\pm$ 0.53	0.56–2.52	51.71
	0.1–0.2	1.76 $\pm$ 0.74	0.71–2.96	42.29
	0.2–0.3	1.98 $\pm$ 0.61	0.91–2.89	30.86
	0.3–0.4	1.92 $\pm$ 0.49	1.11–2.90	25.47

Atributos	Camadas (m)	Média $\pm$ SD	Amplitude	CV (%)
CC (cm ³ cm ⁻³)	0.4–0.5	1.77 $\pm$ 0.31	1.18–2.33	17.24
	0.0–0.1	0.23 $\pm$ 0.03	0.19–0.27	11.40
	0.1–0.2	0.22 $\pm$ 0.03	0.17–0.26	14.53
	0.2–0.3	0.21 $\pm$ 0.03	0.17–0.26	13.52
	0.3–0.4	0.21 $\pm$ 0.04	0.17–0.27	17.88
CA (cm ³ cm ⁻³)	0.4–0.5	0.22 $\pm$ 0.03	0.17–0.28	15.61
	0.0–0.1	0.23 $\pm$ 0.06	0.14–0.32	27.28
	0.1–0.2	0.18 $\pm$ 0.04	0.11–0.27	24.04
	0.2–0.3	0.19 $\pm$ 0.03	0.14–0.24	17.89
	0.3–0.4	0.20 $\pm$ 0.04	0.14–0.27	20.46
AD (cm ³ cm ⁻³)	0.4–0.5	0.20 $\pm$ 0.05	0.13–0.27	22.94
	0.0–0.1	0.09 $\pm$ 0.02	0.07–0.13	20.79
	0.1–0.2	0.08 $\pm$ 0.01	0.06–0.11	18.39
	0.2–0.3	0.07 $\pm$ 0.01	0.06–0.08	10.23
	0.3–0.4	0.07 $\pm$ 0.01	0.05–0.08	13.77
S-index	0.4–0.5	0.07 $\pm$ 0.01	0.05–0.09	15.57
	0.0–0.1	0.04 $\pm$ 0.01	0.03–0.05	25.93
	0.1–0.2	0.03 $\pm$ 0.01	0.02–0.04	21.53
	0.2–0.3	0.03 $\pm$ 0.01	0.02–0.04	20.68
	0.3–0.4	0.03 $\pm$ 0.01	0.02–0.04	22.60
COT (g kg ⁻¹)	0.4–0.5	0.03 $\pm$ 0.01	0.02–0.04	24.53
	0.0–0.1	15.13 $\pm$ 1.19	13.72–16.62	7.87
	0.1–0.2	8.80 $\pm$ 1.02	7.58–10.00	11.59
	0.2–0.3	6.53 $\pm$ 1.00	5.40–7.65	15.32
	0.3–0.4	5.30 $\pm$ 0.54	4.75–5.84	10.19
	0.4–0.5	4.45 $\pm$ 0.59	3.73–5.16	13.26

DMP: diâmetro médio ponderado; AEA: agregados estáveis em água; MAC: macroporosidade; MIC: microporosidade; PT: porosidade total; DS: densidade do solo; RP: resistência à penetração; CC: capacidade de campo; CA: capacidade de aeração; AD: água disponível; COT: carbono orgânico total. DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

A análise inferencial do modelo inferencial misto indicou efeito significativo da interação local $\times$ camada para a maioria das variáveis avaliadas ($p < 0.05$), evidenciando que a resposta do solo ao tempo de cultivo mínimo variou ao longo do perfil (Figuras 5 e 6). Com base na interpretação funcional do perfil, as profundidades foram agrupadas em três compartimentos: camada superficial (0.0–0.1 m), camada intermediária (0.1–0.3 m) e camada subsuperficial (0.3–0.5 m).

Os atributos de agregação apresentaram marcada estratificação vertical. O DMP não diferiu entre os tratamentos na camada superficial ($p > 0.05$), com valores variando entre 2.01 e 2.24 mm, porém na camada intermediária observou-se redução significativa ($p < 0.05$), com a vegetação nativa apresentando valores superiores (≈ 2.4 mm) em 0.1–0.2 m em relação às áreas cultivadas (1.6–2.1 mm), enquanto em profundidades superiores a 0.3 m os valores oscilaram entre 1.5 e 2.3 mm, sem diferenças consistentes entre áreas ($p > 0.05$).

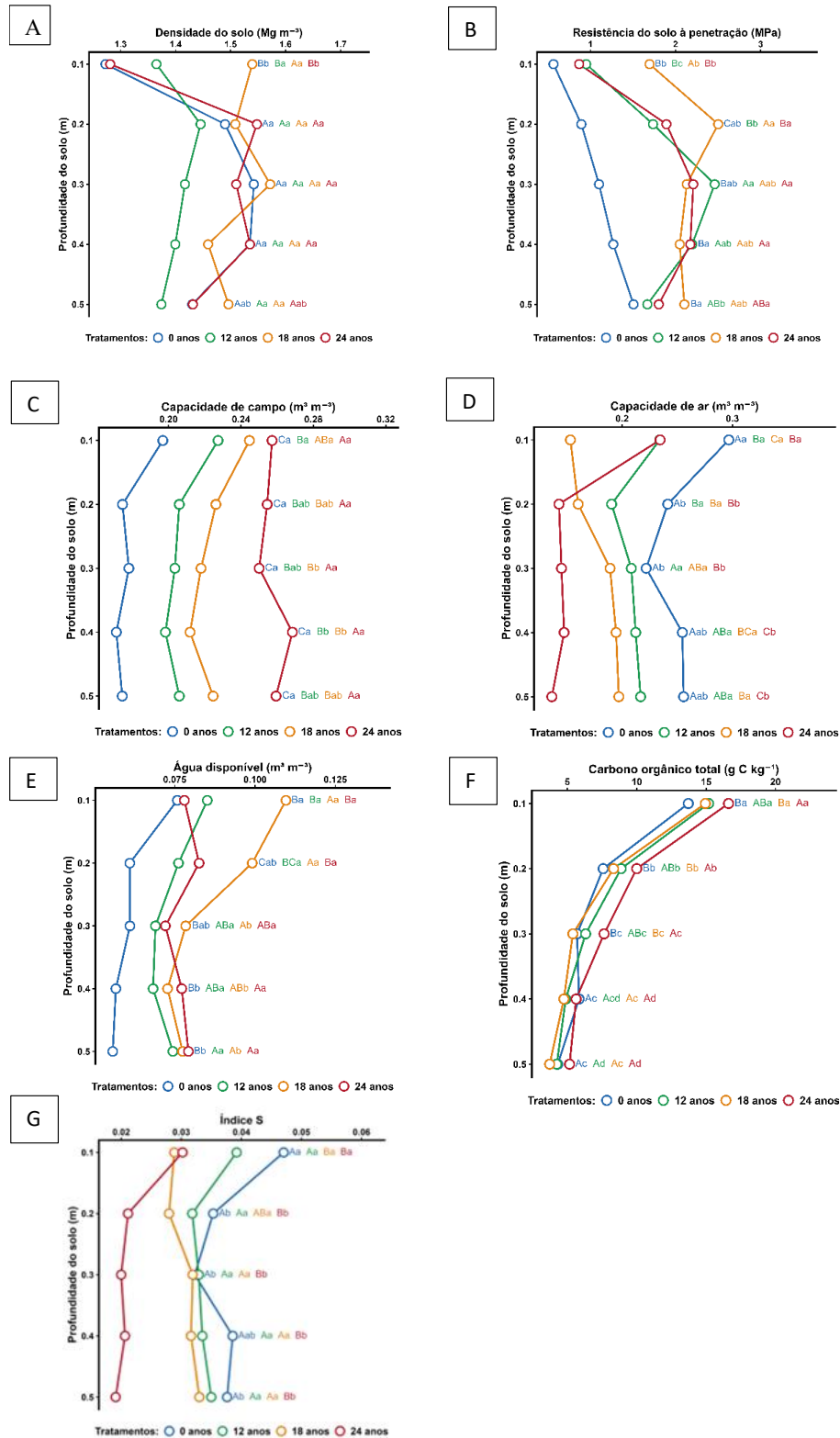


Figura 6 - Densidade do solo, resistência a penetração, capacidade de campo, capacidade de ar, água disponível, S-index e carbono orgânico total em diferentes camadas do solo (0.0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3, 0.3-0.4, 0.4-0.5 m) em áreas com 12, 18 e 24 anos de cultivo mínimo e vegetação nativa. Letras maiúsculas comparam áreas dentro de cada camada; letras minúsculas comparam camadas dentro de cada área. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O AEA também reduziu significativamente com a profundidade ($p < 0.01$), sendo que na camada superficial a área com 18 anos apresentou o maior percentual ($\approx 95\%$), diferindo da vegetação nativa ($\approx 70\%$) ($p < 0.05$), enquanto na camada intermediária (0.1–0.2 m) a vegetação nativa e a área com 12 anos mantiveram valores superiores (75–80%) em relação às áreas com 18 e 24 anos (45–50%) ($p < 0.05$). Em contraste, o PFA manteve-se elevado ao longo de todo o perfil (82–96%), sem efeito significativo do tempo de cultivo na maioria das profundidades ($p > 0.05$).

As alterações na agregação refletiram-se diretamente na organização do sistema poroso. A MAC foi superior na camada superficial sob vegetação nativa (até $0.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação às áreas cultivadas ($0.13\text{--}0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ($p < 0.01$), enquanto na camada intermediária verificou-se redução generalizada ($0.13\text{--}0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), particularmente nas áreas com 18 e 24 anos. A MIC apresentou comportamento inverso na superfície, com menores valores na vegetação nativa ($\approx 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e maiores nas áreas cultivadas ($0.25\text{--}0.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ($p < 0.05$). Nas camadas mais profundas, os valores estabilizaram-se entre 0.19 e $0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sem diferenças entre áreas ($p > 0.05$). Como consequência, a PT diferiu entre áreas apenas na superfície ($p < 0.05$), com valores mais elevados sob vegetação nativa e nas áreas com 12 e 24 anos ($0.49\text{--}0.50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em comparação à área com 18 anos ($\approx 0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Os atributos associados à compactação apresentaram comportamento complementar ao longo do perfil (Figura 6). A DS apresentou menores valores na superfície sob vegetação nativa e na área com 24 anos ($\approx 1.30 \text{ g cm}^{-3}$) e valores superiores nas áreas com 12 e 18 anos ($1.40\text{--}1.55 \text{ g cm}^{-3}$) ($p < 0.05$), enquanto na camada intermediária observou-se o maior nível de compactação, com valores próximos a 1.60 g cm^{-3} na área com 18 anos, reduzindo gradualmente em profundidade ($p < 0.05$). De forma consistente, a RP aumentou significativamente com a profundidade ($p < 0.01$), variando de cerca de 0.60 MPa na superfície sob vegetação nativa para $1.80\text{--}2.40 \text{ MPa}$ na camada intermediária das áreas cultivadas, reduzindo posteriormente para $1.20\text{--}1.80 \text{ MPa}$ na camada subsuperficial.

Quanto aos atributos hídricos, a CC apresentou variação principalmente associada à profundidade ($p < 0.05$), oscilando entre 0.17 e $0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sem diferenças consistentes entre áreas ($p > 0.05$). Em contraste, a CA foi significativamente superior na vegetação nativa na superfície ($\approx 0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação às áreas cultivadas ($0.14\text{--}0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ($p < 0.05$), com redução adicional na camada intermediária ($0.11\text{--}0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A PAW apresentou o maior valor na área com 18 anos na superfície ($\approx 0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), diferindo das demais áreas ($p < 0.05$), enquanto nas profundidades subsequentes os valores variaram entre 0.05 e $0.11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sem diferenças significativas ($p > 0.05$).

Os indicadores integradores confirmaram a estratificação estrutural do perfil. O S-index apresentou efeito significativo da profundidade ($p < 0.01$), com valores mais elevados na superfície sob vegetação nativa (≈ 0.05) e menores nas áreas cultivadas (0.03–0.04), enquanto a partir da camada intermediária os valores situaram-se predominantemente entre 0.02 e 0.04, indicando limitações estruturais em profundidade. De maneira consistente, o COT apresentou forte redução vertical ($p < 0.001$), com valores superficiais de até 18.5 g kg^{-1} na área com 24 anos, diminuindo para $3.9\text{--}7.9 \text{ g kg}^{-1}$ nas camadas mais profundas.

A análise do SI (Tabela 4) revelou um gradiente claro ao longo do perfil. Na camada superficial, a vegetação nativa e a área com 12 anos apresentaram condição estável ($SI > 9$), enquanto as áreas com 18 e 24 anos foram classificadas como baixo risco (SI entre 7 e 9). Na camada intermediária (0.1–0.2 m), a vegetação nativa e a área com 12 anos mantiveram-se em alto risco (SI entre 5 e 7), enquanto as áreas com 18 e 24 anos já apresentavam condição degradada ($SI < 5$). Na camada subsuperficial (0.3–0.5 m), todas as áreas, incluindo a vegetação nativa, apresentaram valores inferiores a 5, confirmando que a degradação estrutural em profundidade é um atributo natural do Latossolo e não resultado do manejo agrícola.

Tabela 4 - Índice de estabilidade estrutural (SI, %) e classificação do risco de degradação em diferentes camadas de Latossolo Amarelo sob vegetação nativa e diferentes tempos de cultivo mínimo (12, 18 e 24 anos).

Camada (m)	Vegetação nativa		12 anos		18 anos		24 anos	
	SI (%)	Classe	SI (%)	Classe	SI (%)	Classe	SI (%)	Classe
0.0–0.1	9,38	Estável	9,78	Estável	8,86	Baixo risco	7,82	Baixo risco
0.1–0.2	5,27	Alto risco	5,61	Alto risco	4,71	Degradado	4,55	Degradado
0.2–0.3	4,04	Degradado	3,57	Degradado	2,80	Degradado	3,22	Degradado
0.3–0.4	3,99	Degradado	2,70	Degradado	2,37	Degradado	2,12	Degradado
0.4–0.5	2,68	Degradado	2,19	Degradado	1,72	Degradado	1,91	Degradado

Crítérios de classificação (Pieri, 1992): >9 = estruturalmente estável; $7\text{--}9$ = baixo risco de degradação; $5\text{--}7$ = alto risco de degradação; <5 = solo estruturalmente degradado

5 DISCUSSÃO

Os padrões de qualidade física do solo observados neste estudo evidenciam a complexa interação entre tempo de cultivo, profundidade do perfil e características pedogenéticas intrínsecas de Latossolos altamente intemperizados com textura média e elevada participação da fração areia, sendo que a análise integrada dos indicadores físicos permitiu identificar três compartimentos funcionais distintos ao longo do perfil, cada um refletindo diferentes combinações de efeitos do manejo e condicionantes naturais. A marcada estratificação vertical observada para os atributos de agregação e para o COT evidencia o papel fundamental da matéria orgânica na manutenção da estrutura superficial do solo, uma vez que a similaridade dos valores de DMP entre as áreas na camada superficial indica que o cultivo mínimo tem contribuído para a preservação da agregação estrutural na interface solo-atmosfera, mesmo após mais de duas décadas de uso agrícola. Esse comportamento é consistente com o modelo hierárquico de agregação proposto por Six; Elliott e Paustian (2000) no qual o aporte contínuo de resíduos vegetais em sistemas conservacionistas favorece a formação de macroagregados por meio da atividade microbiana e da produção de agentes cimentantes orgânicos, sendo corroborado por Manhas *et al.* (2015), que observaram estabilidade estrutural superficial relativamente preservada em Latossolos sob plantio direto em função do acúmulo de biomassa na superfície.

O elevado teor de COT na camada superficial da área com 24 anos (até 18.5 g kg^{-1}) sugere que, sob manejo adequado e prolongado, pode ocorrer recuperação gradual do carbono orgânico, alcançando ou mesmo superando os níveis encontrados sob vegetação nativa, o que está alinhado com os achados de Corbeels *et al.* (2016), que em estudo com cronossequências de plantio direto no Cerrado observaram que os estoques de carbono sob plantio direto atingiram níveis equivalentes aos do Cerrado nativo após 14 anos de adoção. No entanto, a redução do COT a partir da camada de 0.1 m, com valores inferiores a 10 g kg^{-1} , evidencia a dependência da agregação ao aporte superficial de resíduos, limitando os efeitos benéficos do cultivo mínimo às camadas mais superficiais, de modo que a redução do DMP e do AEA na camada intermediária das áreas cultivadas, especialmente nas áreas com maior tempo de uso, indica que mesmo sob manejo conservacionista, a estrutura do solo pode apresentar restrições graduais em profundidade. Esse padrão sugere que os efeitos cumulativos do tráfego de máquinas e das operações agrícolas tendem a reduzir a eficiência dos mecanismos naturais de formação e estabilização de macroagregados subsuperficiais, especialmente em solos com maior proporção de partículas arenosas, nos quais a coesão estrutural depende fortemente da

matéria orgânica e da conectividade dos poros estruturais, conforme ressaltado por Six e Paustian (2014), que destacaram a sensibilidade da matéria orgânica particulada fundamental para a formação de macroagregados e para a conectividade estrutural às perturbações decorrentes do manejo agrícola.

A camada intermediária foi identificada como a região de maior restrição mecânica ao longo do perfil, evidenciada pelos valores elevados de DS e RP, especialmente nas áreas com 18 e 24 anos de cultivo, onde o aumento da DS para valores próximos a 1.60 g cm^{-3} na área com 18 anos, associado à RP variando entre 1.80 e 2.40 MPa, aproxima-se dos limites críticos relatados para Latossolos de textura média sob uso agrícola intensivo (Håkansson; Lipiec, 2000). Taylor e Ratliff (1969) estabeleceram o valor de 2 MPa como limite crítico para o crescimento radicular da maioria das culturas, enquanto Lipiec *et al.* (2012) demonstraram que valores nessa faixa podem reduzir significativamente o alongamento radicular, especialmente em condições de baixa disponibilidade hídrica, sendo que a concentração desses valores na faixa de 0.1–0.3 m é coerente com a profundidade de atuação das operações mecanizadas, incluindo aração, gradagem e subsolagem eventual, conforme descrito no histórico de manejo. Hamza e Anderson (2005) destacaram que o tráfego repetitivo de máquinas agrícolas, mesmo em sistemas conservacionistas, pode resultar na formação de camadas compactadas subsuperficiais quando não associado a práticas complementares de descompactação, e a subsolagem eventual realizada em 2019 pode ter atenuado parcialmente os efeitos da compactação na área com 24 anos, contribuindo para a redução da DS observada na camada superficial dessa área, conforme sugerido por Calonego *et al.* (2017), que demonstraram os benefícios da descompactação periódica em sistemas de plantio direto de longa duração.

À medida que se avança em profundidade, a redução gradual da DS e da RP em profundidades superiores a 0.3 m, associada à diminuição do COT e à manutenção de valores elevados de PFA, sugere que as limitações estruturais na camada subsuperficial são predominantemente de origem pedogenética, relacionadas à mineralogia oxídica e ao adensamento natural característico de Latossolos altamente intemperizados (Reichert *et al.*, 2016), de modo que essa distinção entre efeitos antrópicos (camada intermediária) e condicionantes naturais (camada subsuperficial) é fundamental para interpretações mais realistas sobre a sustentabilidade física de agroecossistemas em regiões de expansão agrícola no Cerrado. As alterações estruturais observadas refletiram-se diretamente na funcionalidade hidrofísica do solo, uma vez que a redução da MAC nas áreas cultivadas, especialmente na camada superficial e intermediária, evidencia o impacto do tráfego mecanizado mesmo em sistemas de cultivo mínimo, sendo a macroporosidade reconhecida como um dos atributos

físicos mais sensíveis à compactação (Reichert *et al.*, 2016), com a diminuição da AC nas áreas cultivadas apresentando valores na camada intermediária que se aproximam de $0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ limite considerado crítico por Reynolds *et al.* (2009) para adequada difusão gasosa o que sugere restrições potenciais à aeração do solo e possíveis impactos sobre a atividade microbiana e o desenvolvimento radicular.

Em contrapartida, o aumento da MIC nas áreas cultivadas na superfície indica reorganização do sistema poroso caracterizada pela transformação de poros maiores em poros menores, fenômeno interpretado por Dexter (2004) como mecanismo de compensação estrutural, embora conforme ressaltado por Reynolds *et al.* (2009), essa reorganização não implique necessariamente melhoria funcional, uma vez que poros de menor diâmetro apresentam menor eficiência na aeração e na condução rápida de água. A relativa estabilidade da CC entre áreas sugere forte controle textural desse atributo, conforme discutido por Reichardt e Timm (2020) para solos tropicais, enquanto os baixos valores de AD ao longo do perfil são característicos de Latossolos com textura média e predominância de frações arenosas, nos quais a retenção hídrica depende fortemente do carbono orgânico e da estabilidade estrutural do sistema poroso (Minasny; McBratney, 2018). A avaliação do S-index evidenciou clara estratificação funcional da qualidade física ao longo do perfil, com valores mais elevados na camada superficial indicando condições estruturais mais favoráveis, enquanto nas camadas intermediária e subsuperficial predominaram valores inferiores ao limite indicativo de boa qualidade estrutural (< 0.035), sugerindo possíveis restrições à continuidade do sistema poroso e ao crescimento radicular em profundidade (Dexter, 2004; Reynolds *et al.*, 2009).

No entanto, estudos com solos de textura média em regiões tropicais e temperadas demonstraram que os limites críticos propostos para o S-index não são universalmente válidos, classificando solos com qualidade física intermediária de forma inconsistente com outros indicadores (Pulido-Moncada *et al.*, 2015), e corroborando esta observação, Andrade e Stone (2009) demonstraram que o S-index pode não refletir adequadamente a qualidade física em solos do Cerrado brasileiro com textura média a arenosa, sugerindo a necessidade de calibração regional dos limites críticos. Essa limitação reforça a importância de utilizar o S-index em conjunto com outros atributos mais facilmente mensuráveis, como densidade e porosidade, e aponta para a necessidade de estudos adicionais que estabeleçam valores de referência específicos para as condições edafoclimáticas do Cerrado piauiense.

De forma complementar, o índice de estabilidade estrutural (SI) revelou um gradiente claro de degradação estrutural ao longo do perfil, com a camada superficial apresentando-se estável ou sob baixo risco de degradação, a camada intermediária mostrando transição para

condições degradadas com o aumento do tempo de cultivo, e a camada subsuperficial apresentando-se degradada em todas as áreas, inclusive na vegetação nativa, evidenciando a sensibilidade do SI na detecção de alterações iniciais na organização estrutural do solo sob uso agrícola prolongado, bem como sua capacidade de distinguir os efeitos do manejo das limitações naturais do solo, uma vez que a ocorrência de valores reduzidos de SI mesmo sob vegetação nativa em profundidades superiores a 0.3 m confirma que parte das limitações estruturais observadas possui origem pedogenética, associada à mineralogia oxídica e aos baixos teores naturais de carbono orgânico característicos de Latossolos altamente intemperizados (Pieri, 1992; Reichert *et al.*, 2016).

A interpretação integrada do S-index e do SI permite compreender de forma mais abrangente a dinâmica da qualidade física do solo ao longo do perfil, pois enquanto o SI expressa o potencial estrutural relacionado à disponibilidade de matéria orgânica e à fração fina do solo, o S-index representa de maneira mais direta a funcionalidade hidrofísica do sistema poroso e sua influência sobre processos como infiltração de água, difusão gasosa e crescimento radicular (Dexter, 2004; Reynolds *et al.*, 2009), de forma que a redução simultânea desses índices na camada intermediária evidencia o desenvolvimento de zonas com maior resistência mecânica e menor eficiência estrutural, ao passo que os baixos valores observados em profundidade, inclusive sob vegetação nativa, indicam limitações físicas inerentes à pedogênese desses solos tropicais. Por fim, os resultados obtidos demonstram que, embora o cultivo mínimo favoreça a preservação da qualidade física na camada superficial, a persistência de restrições mecânicas na camada intermediária limita a sustentabilidade física de longo prazo do solo, evidenciando a necessidade de adoção de estratégias complementares de manejo, tais como o uso de plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso, como espécies do gênero *Brachiaria* e *Crotalaria*, que têm sido apontadas como prática eficaz na mitigação da compactação subsuperficial, promovendo a formação de bioporos e a melhoria da continuidade estrutural do perfil (Calonego *et al.*, 2017; Torino *et al.*, 2020), bem como o manejo racional do tráfego agrícola, incluindo o controle da pressão de inflação dos pneus e a adoção de sistemas de agricultura de precisão para redução do tráfego repetitivo, que pode contribuir para minimizar os efeitos cumulativos da compactação (Keller *et al.*, 2019; Mier *et al.*, 2025). A integração dessas práticas aos sistemas de cultivo mínimo é essencial para assegurar a funcionalidade física do solo em profundidade e aumentar a resiliência dos agroecossistemas frente à intensificação do uso agrícola no Cerrado.

6 CONCLUSÃO

A qualidade física do solo apresentou forte estratificação funcional. O cultivo mínimo preservou a estabilidade estrutural na camada superficial, porém não impediu a formação de uma zona compactada entre 0,1 e 0,3 m, caracterizada por densidade do solo em torno de $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ e resistência à penetração próxima a 2 MPa após 24 anos.

Os indicadores S-index e, principalmente, o índice de estabilidade estrutural (SI) mostraram-se sensíveis na distinção entre os efeitos do manejo, observados na camada intermediária, e as limitações pedogenéticas naturais, predominantes na camada subsuperficial. Diante desses resultados, recomenda-se a adoção de estratégias complementares de manejo que favoreçam a melhoria das condições físicas do solo em subsuperfície, como o uso de plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso e o manejo adequado do tráfego agrícola, com vistas à mitigação da compactação e à manutenção da qualidade física do solo a longo prazo em Latossolos sob cultivo mínimo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. F.; SANCHES, B. C. Disponibilidade de carbono orgânico nos solos do cerrado brasileiro. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 4, p. 259-264, 2014.
- ALVALÁ, R. C. S.; VON RANDOW, C. Seasonal variability of vegetation and its relationship to rainfall and fire in the Brazilian tropical savanna. In: FRITZSCHE, L. H. (Ed.). **Vegetation: Properties, Uses and Conservation**. Rijeka: InTech, 2012. p. 119-140.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, R. P.; COUTO JUNIOR, A. F.; MARTINS, E. S.; NARDOTO, G. B. Role of soil carbon in the landscape functioning of the Alto São Bartolomeu watershed in the Cerrado region, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1405-1414, 2016.
- 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.
- ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; LEITE, L. F. C.; SOUZA, Z. M.; SOUSA, A. C. M. Physical quality of a yellow latossol under integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 717-726, 2010.
- ARRUDA, D. M.; LIMA, D. A. E.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. Deforestation in areas of higher suitability does not imply greater productivity: the mismatch between environmental and economic sustainability in the Cerrado. **Sociedade & Natureza**, v. 37, 2025.
- AVANZI, J. C.; NORTON, L. D.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. A. Aggregate stability in soils cultivated with eucalyptus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 89-96, 2011.
- BARBOSA, L. R.; OLIVEIRA, F. P.; SOUZA, H. A.; LEITE, L. F. C.; NUNES, L. A. P. L. Propriedades físico-hídricas de um argissolo sob plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 2, p. 433-444, 2022.
- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1-48, 2015.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E.; MARTIN-NETO, L.; PAVINATO, A. Tillage effects on particulate and mineral-associated organic matter in two tropical Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 37, n. 3-4, p. 389-400, 2007.
- BIDADARI, S. G.; FAUZI, M. T.; SUDHARMAWAN, A. A. The effectiveness of implementing agroforestry systems in improving soil quality. **Jurnal Biologi Tropis**, v. 25, n. 4b, 2025.

BOBUL'SKÁ, L.; ESPÍNDOLA, S. P.; COELHO, M. A.; FERREIRA, A. S. Impact of land use on soil function and bacterial community in the Brazilian savanna. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 1, 2021.

BRAGANÇA, A. A. The causes and consequences of agricultural expansion in Matopiba. **Revista Brasileira de Economia**, v. 72, n. 1, p. 1-18, 2018.

BRITO, G. S.; BAUTISTA, S.; LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R. Labile soil organic carbon loss in response to land conversion in the Brazilian woodland savanna (cerradão). **Biogeochemistry**, v. 144, n. 3, p. 311-329, 2019.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. A economia agropecuária do Matopiba. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 26, n. 2, p. 376-401, 2018.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31-37, 2017.

CARDOSO, J. C. F.; TREVIZAN, R.; MARUYAMA, P. K.; CAETANO, A. P. S.; GONÇALVES, R. V.; ANTONINI, Y.; OLIVEIRA, P. E. Pollination and plant reproduction in the Cerrado, the world's most biodiverse savanna. **Biological Reviews**, v. 100, n. 1, p. 245-272, 2025.

CARMIGNOTTO, A. P.; PARDINI, R.; VIVO, M. Habitat heterogeneity and geographic location as major drivers of Cerrado small mammal diversity across multiple spatial scales. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 9, p. 693041, 2022.

CARVALHO, A. M.; MARCHÃO, R. L.; SOUZA, K. W.; BUSTAMANTE, M. M. C. Soil fertility status, carbon and nitrogen stocks under cover crops and tillage regimes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1-10, 2014.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PÍCCOLO, M. C.; GODINHO, V. P.; HERPIN, U.; CERRI, C. C. Conversion of cerrado into agricultural land in the south-western Amazon: carbon stocks and soil fertility. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 2, p. 233-241, 2009.

COCA, E.; SOYER, G.; RICARDO JUNIOR, B. Matopiba's disputed agricultural frontier: between commodity crops and agrarian reform. **IDS Bulletin**, v. 54, n. 1, 2023.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2022/23**. Brasília, DF: CONAB, 2023.

CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; NETO, M. S.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.; SCOPEL, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, v. 6, p. 21450, 2016.

CORTEZ, J. W.; FERNANDES, A. L. T.; CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A. Modificação dos parâmetros físico-hídricos do solo sob diferentes sistemas de irrigação na cafeicultura. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 2, p. 259-264, 2010.

- COUTINHO, H. L. C.; NOELLEMAYER, E.; BALIEIRO, F. C.; PIÑEIRO, G.; FIDALGO, E. C. C.; MARTIUS, C.; SILVA, C. F. Impacts of land-use change on carbon stocks and dynamics in central-southern South American biomes: Cerrado, Atlantic Forest and Southern Grasslands. *In*: NOELLEMAYER, E. (Ed.). **Carbon Sequestration Potential of South American Ecosystems**. Wallingford: CABI, 2014. p. 125-145.
- COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. *In*: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). **Fire in the Tropical Biota: Ecosystem Processes and Global Challenges**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1990. p. 82-105.
- D'HAENE, K. An indicator for soil physical quality in integrated sustainability assessment models. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 58, p. S66-S70, 2012.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.
- FARIAS, M. F.; FEITOSA, C. E. L.; RODRIGUES, K. M.; TEIXEIRA, L. C.; FURTADO, M. B.; PARRA-SERRANO, L. J. Impact of management on the physical attributes of a dystrophic yellow latosol. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, n. 5, p. 217-228, 2017.
- FEITOSA, C. E. L.; COSTA, P. H. D. S.; MENESES, K. C.; OLIVEIRA, U. C.; FARIAS, M. F. Changes in physical quality of oxisols under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 5, p. 609-616, 2020.
- FERNANDES, K. L.; RIBON, A. A.; JUNIOR, J. M.; BAHIA, A. S. R. S.; TAVARES FILHO, J. Characterization, classification and analysis of the main properties of the Southwestern Goiás soil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 3, p. 1135-1148, 2016.
- FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 245-257, 2004.
- FERRAZ-ALMEIDA, R.; MOTA, R. P. Routes of soil uses and conversions with the main crops in Brazilian Cerrado: a scenario from 2000 to 2020. **Land**, v. 10, n. 11, 2021.
- FERRAZ-ALMEIDA, R.; SILVA, C. U.; RIBEIRO, F. R. M. Soil erosion and routes of use and production in the Matopiba region, Brazil. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 98, n. 1, p. 1-14, 2023.
- FONTENELE, W. J.; ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; PINTO, F. E. D. Atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado piauiense. **Periódica**, v. 40, n. 2, p. 194-202, 2009.
- FREITAS, I. C.; ALVES, M. A.; PENA, A. N. L.; FERREIRA, E. A.; FRAZÃO, L. A. Changing the land use from degraded pasture into integrated farming systems enhance soil carbon stocks in the Cerrado biome. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, n. 1, 2023.
- FREITAS, L.; MARTINS FILHO, M. V.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. G. Soil quality indicator of oxisols grown with sugarcane and native forest in northeastern São Paulo state, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 17, 2018.

FUNNICELLI, M. I. G.; LIMA, N. S. M.; SARTINI, C. C. F.; LEMOS, E. G. M.; ARAÚJO NETO, R. B.; SOUZA, H. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SAGRILO, E.; BLANCO, F. F.; ANDRADE, H. A. F.; SOUSA, D. C.; SILVA, M. L. N.; LEITE, L. F. C.; LIMA, P. S. C.; PINHEIRO, D. G. Revealing the bacteriome in crop-livestock-forest integration systems in the Cerrado of MATOPIBA, Brazil. **Forests**, v. 16, n. 4, 2025.

GASQUES, L. R.; SILVA, L. S.; NOGUEIRA, B. K. A.; DAVI, J. E. A.; RIBEIRO, D. O.; TIECHER, T.; RATKE, R. F.; SOUZA, E. D. Long-term successive poultry litter application improves Oxisol fertility in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 47, n. 1, 2025.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1 - Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, p. 383-411, 1986.

GILES, A. L.; FARIA, L. D. B.; SOUZA, H. J.; RODRIGUES, S. B.; MUNARI, L. C.; RIBEIRO, R. S.; PINHO, G. S. C.; TEIXEIRA, M. D. R.; DIANESE, É.; GRILLO, B.; CARVALHO, R.; LEÃO, R. Á.; TRINDADE, A. L.; JUNIOR, C. R. A.; ANDRADE, D. F. C.; FRANÇOSO, R. Mapping and revealing the tree biodiversity of the Brazilian Cerrado through biome-wide sampling efforts. **NPJ Biodiversity**, v. 5, n. 1, 2026.

GUALBERTO, A. V. S.; SOUZA, H. A.; SAGRILO, E.; ARAÚJO, A. S. F.; MENDES, L. W.; MEDEIROS, E. V.; PEREIRA, A. P. A.; COSTA, D. P.; VOGADO, R. F.; CUNHA, J. R.; TEIXEIRA, M. L.; LEITE, L. F. C. Organic C fractions in topsoil under different management systems in Northeastern Brazil. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, 2023.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Estoque de carbono em Latossolo Vermelho Distroférrico sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 4, p. 1-8, 2012.

GUIMARÃES, G. P.; MENDONÇA, E. S.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Soil aggregation and organic carbon of Oxisols under coffee in agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 278-287, 2014.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71-85, 2000.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World reference base for soil resources**: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4. ed. Vienna: International Union of Soil Sciences, 2022.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. **Plant and Soil**, v. 338, n. 1-2, p. 467-481, 2010.

KATO, L.; SEVERINO, V. G. P.; TELES, A. M.; MORAES, A. P.; WAKUI, V. G.; GOMIDES, N. A. M. T. P.; LIMA, R. D. C. L.; OLIVEIRA, C. M. A. Natural products structures and analysis of the Cerrado flora in Goiás. In: PESSOA, O. D. L. (Ed.). **Natural products from the Cerrado**. Boca Raton: CRC Press, 2019. p. 281-304.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104293, 2019.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

LEÃO, T. P. Water retention and penetration resistance equations for the least limiting water range. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 1-8, 2019.

LIMA, V. M. P.; LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; RODRIGUES, S. Critical limits of soil physical properties for crop production in Brazilian Oxisols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1178-1187, 2013.

LIPIEC, J.; HORN, R.; PIETRUSIEWICZ, J.; SICZEK, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, p. 74-81, 2012.

LOBATO, M. G. R.; SAMPAIO, F. M. T.; NÓBREGA, J. C. A.; FERREIRA, M. M.; MATIAS, S. S. R.; TORRES, A. F.; SILVA, C. P.; CUNHA, C. S. M. Physical attributes of an Oxisol from the Brazilian Cerrado under different management systems. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 1, p. 361-371, 2017.

LOCATELLI, J. L.; LIMA, R. P.; SANTOS, R. S.; CHERUBIN, M. R.; CREAMER, R. E.; CERRI, C. E. P. Soil strength and structural stability are mediated by soil organic matter composition in agricultural expansion areas of the Brazilian Cerrado biome. **Agronomy**, v. 13, n. 1, 2022.

MACEDO, J.; BRYANT, R. B. Morphology, mineralogy, and genesis of a hydrosquence of Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, n. 3, p. 690-695, 1987.

MACHADO, C. E.; SILVA, A.; RODRIGUES, A.; LALES, E.; SILVA FILHO, F.; SILVA, J.; LIMA, M. Native vegetation outperforms pasture in sustaining deep soil carbon in tropical savannas. **ESS Open Archive**, 2026.

MANHAS, S. S.; SIDHU, A. S.; BRAR, K. S. Conservation tillage for soil management and crop production. In: LICHTFOUSE, E. (Ed.). **Sustainable agriculture reviews**, v. 17. Cham: Springer, p. 1-30, 2015.

MAPELLI, F.; MARASCO, R.; FUSI, M.; SCAGLIA, B.; TSIAMIS, G.; ROLLI, E.; FODELIANAKIS, S.; BOURTZIS, K.; VENTURA, S.; TAMBONE, F.; ADANI, F.; BORIN, S.; DAFFONCHIO, D. The stage of soil development modulates rhizosphere effect

along a High Arctic desert chronosequence. **The ISME Journal**, v. 12, n. 5, p. 1188-1201, 2018.

MARCHÃO, R. L.; LAVELLE, P.; CELINI, L.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 8, p. 1011-1020, 2009.

MARINHO JUNIOR, J. L.; PISCOYA, V. C.; FERNANDES, M. M.; GONÇALVES, S. B.; HOLANDA, F. S. R.; CUNHA FILHO, M.; GOMES FILHO, R. R.; PEDROTTI, A.; ARAÚJO FILHO, R. N. Carbon dynamics in humic fractions of soil organic matter under different vegetation cover in Southern Tocantins. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 1, 2021.

MASSEROLI, A.; BOLLATI, I. M.; LA LICATA, M.; PELFINI, M.; TROMBINO, L. The relative imprint of forming factors on soil characteristics in a recently deglaciated area: concerns about chronosequences approach. **Physical Geography**, v. 44, n. 4, p. 401-425, 2022.

MELO, L. F. S.; PICANÇO JUNIOR, P. L.; ESPINDOLA, G. M. Analysis of burns and deforestation resulting from agricultural practices in the Matopiba region: case study in the municipalities of Piauí. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 2, 2024.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39-47, 2018.

MOREIRA, G. M.; NEVES, J. C. L.; ROCHA, G. C.; MAGALHÃES, C. A. S.; FARIAS NETO, A. L.; MENEGUCI, J. L. P.; FERNANDES, R. B. A. Physical quality of soils under a crop-livestock-forest system in the Cerrado/Amazon transition region. **Revista Árvore**, v. 42, n. 2, 2018.

NDZANA, G. M.; BIDJECK, L. M. B.; TAMFUH, P. A.; KOLLEH, A. D.; AHANDA, D. H. O.; BEKOA, E.; KUBAR, K. A.; KOA, T. M. A.; AMADOU, A.; ABANE, M. A.-A.; BITOM, L. D. Impact of iron and aluminum on the aggregate stability of some Latosols in Central and Southern Liberia (West Africa). **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 33, n. 16, p. 185-199, 2021.

NGOLO, A. O.; OLIVEIRA, F. S.; OLIVEIRA, M. F.; FERNANDES, R. B. A. Microstructural changes in Oxisols under long-term different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, 2023.

NGOLO, A. O.; OLIVEIRA, M. F.; ASSIS, I. R.; ROCHA, G. C.; FERNANDES, R. B. A. Soil physical quality after 21 years of cultivation in a Brazilian Cerrado Latosol. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 3, p. 124-135, 2019.

OLIVEIRA, D. B.; LACERDA, J. J.; CAVALCANTE, A. P.; BEZERRA, K. G.; SILVA, A. P. M.; MIRANDA, A. C. G.; RAMBO, T. P.; MASCHIO, R.; ANDRADE, H. A. F.; COSTA, P. M.; SOUSA, C. A. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SAGRILO, E.; SOUZA, H. A. Lime and gypsum rates effects in new soybean areas in the Cerrado of Matopiba, Brazil. **Agriculture**, v. 14, n. 7, 2024.

- OLIVEIRA, V. A.; SANTOS, G. G.; KER, J. C.; COUTO, E. G.; JACOMINE, P. K. T.; CORRÊA, G. R.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R. Soils of Cerrados, the Brazilian savannas. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; TORRADO, P. V. (Ed.). **The Soils of Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 115-161.
- PAPA, R.; LACERDA, M. P. C.; CAMPOS, P. M.; GOEDERT, W. J.; RAMOS, M. L. G.; KATO, E. Qualidade de Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos sob vegetação nativa de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 4, p. 524-533, 2011.
- PAVEI, D. S.; PANACHUKI, E.; SALTON, J. C.; SONE, J. S.; ALVES, T.; VALIM, W. C.; OLIVEIRA, P. T. S. D. Soil physical properties and interrill erosion in agricultural production systems after 20 years of cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210039, 2021.
- PEREIRA, C.; CASTRO, C.; PORCIONATO, G. Expansão da agricultura no MATOPIBA e impactos na infraestrutura regional. **Revista de Economia Agrícola**, v. 65, n. 1, p. 1-14, 2018.
- PEREIRA, D. S.; MONTANARI, R.; OLIVEIRA, C. F.; RAMOS, J. C. A.; PANOSSO, A. R.; SOUZA, Z. M.; GONZÁLEZ, A. P. Physical quality of an Oxisol in different agricultural systems in Brazilian Cerrado. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 7, p. 46-57, 2018.
- PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A. N.; ALMEIDA, C. X. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 195-203, 2010.
- PIERI, C. J. M. G. **Fertility of soils: a future for farming in the West African savannah**. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; GONÇALVES, R. G. M.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Soil quality indicators in conventional and conservation tillage systems in the Brazilian Cerrado. **Research Square**, 2021a.
- PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G. Physicogenic and biogenic aggregates under different management systems in the Cerrado region, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021b.
- PIRES, G. C.; DENARDIN, L. G. O.; SILVA, L. S.; FREITAS, C. M.; GONÇALVES, E. C.; CAMARGO, T. A.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. A fertilização sistêmica aumenta a produtividade da soja por meio da melhoria da qualidade do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária em solos tropicais. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 4487-4495, 2022.
- POMPEU, P. S.; CARVALHO, D. R.; JUNQUEIRA, N. T.; HUGHES, R. M.; LEAL, C. G.; CASTRO, M. A. Advances in understanding landscape influences on freshwater habitats and biological assemblages. In: INFANTE, D. M.; HUGHES, R. M.; TSANG, Y. P. (Ed.). **Freshwater Fish and Their Habitats: Landscapes to catchment scales**. Bethesda: American Fisheries Society, 2019. p. 1-22.

PULIDO-MONCADA, M. A.; BALL, B. C.; GABRIËLS, D.; LOBO, D.; CORNELIS, W. Evaluation of soil physical quality index S for some tropical and temperate medium-textured soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 1, p. 9-19, 2015.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2023.

RAHMAN, M. S.; RAIHAN, A.; ISLAM, S.; PAUL, P.; KARMAKAR, S. Enhancing soil carbon sequestration and land restoration through tropical forest management. **Journal of Agriculture Sustainability and Environment**, v. 2, n. 2, p. 1-12, 2023.

RAMPELOTTO, P. H.; FERREIRA, A. S.; BARBOZA, A. D. M.; ROESCH, L. F. W. Changes in diversity, abundance, and structure of soil bacterial communities in Brazilian savanna under different land use systems. **Microbial Ecology**, v. 66, n. 3, p. 593-603. 2013.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Water infiltration into the soil. In: REICHARDT, K.; TIMM, L. C. (Ed.). **Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 195-212.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P.; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-132. 2016.

REIS JÚNIOR, R. A.; SILVA, D. R. G.; ÁVILA, F. W.; ÁVILA, P. A.; SOARES, D. A.; FAQUIN, V. Productivity and agronomic efficiency of cotton plants in response to nitrogen and sulfur supply. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 4, p. 572-578. 2012.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras: Editora UFLA. 2014.

RESENDE, T. M.; ROSOLEN, V.; BERNOUX, M.; MOREIRA, M. Z.; CONCEIÇÃO, F. T. Dynamics of soil organic matter in a cultivated chronosequence in the Cerrado. **Soil Research**, v. 55, n. 3. 2017.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3-4, p. 252-263. 2009.

RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, v. 68, p. 95-112, 1949.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Caracterização do bioma Cerrado a partir de imagens de satélite. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções**. Brasília: Embrapa, p. 25-48, 2020.

SANTOS, D. P.; SCHOSSLER, T. R.; SANTOS, I. L.; MELO, N. B.; NÓBREGA, J. C. A.; SANTOS, G. G. Physical-hydric attributes in Latossolo Amarelo under systems of use in Cerrado/Caatinga ecotone. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 4. 2021.

SANTOS, G. G.; SILVA, A. M.; SOUSA, A. P. M.; SILVA, E. F. MATOPIBA: caracterização e desafios da nova fronteira agrícola. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 4, p. 56-71. 2016.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa. 2018.

SANTOS, R. A.; COSTA, S. M.; CARNEIRO, V. A.; OLIVEIRA, A. L. R.; VASCONCELOS MILHOMEM, A. Sistema de plantio direto: conservação e manutenção da capacidade produtiva dos solos do Cerrado Goiano. **Revista Sapiência**, v. 7, n. 2, p. 230-255. 2018.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa: SBCS. 2015.

SARAVIA-MALDONADO, S. A.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. Á.; RAMÍREZ-ROSARIO, B.; FERNÁNDEZ-POZO, L. F. Change in land use affects soil organic carbon dynamics in tropical systems. **Soil Systems**, v. 8, n. 3. 2024.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; OLIVEIRA, P. D.; RODRIGUES, S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics**, v. 29, n. 4. 2015.

SATTOLO, T. M. S.; PEREIRA, L. M.; OTTO, R.; FRANCISCO, E.; DUARTE, A. P.; KAPPES, C.; PROCHNOW, L. I.; CHERUBIN, M. R. Effects of land use and crop diversification on soil physical quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 5. 2021.

SAUER, D. Pedological concepts in soil chronosequence studies. **Soil Research**, v. 53, n. 1. 2015.

SCHOSSLER, T. R.; MARCHÃO, R. L.; SANTOS, I. L.; SANTOS, D. P.; NÓBREGA, J. C. A.; SANTOS, G. G. Soil physical quality in Cerrado agricultural systems. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 4. 2018.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; SILVA, F. G.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in latosols: I - relationships between soil physical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 813-822, 2011a.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; BENITES, V. M.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in latosols: II - soil compressive behavior. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 823-831, 2011b.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; COSTA, K. A. P.; CARDUCCI, C. E. Preconsolidation pressure and soil water retention in Latosols. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 193-202, 2013.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHEPARD, C.; SCHAAP, M. G.; PELLETIER, J. D.; RASMUSSEN, C. A probabilistic approach to quantifying soil physical properties via time-integrated energy and mass input. **Soil**, v. 3, n. 2, p. 67-82, 2017.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, J. J. Características físico-hídricas de um latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 5, p. 378-388. 2014.

SILVA, R. F.; SANTOS, G. G.; NÓBREGA, J. C. A.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS, B. O.; SANTOS, D. P.; SILVA JÚNIOR, J. P. Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo (Oxisol). **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, p. 109-120. 2017.

SILVA, S. G.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; SOUZA, G. S.; FARIA, A. J. G. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo e culturas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1509-1518. 2014.

SILVA-LEITE, R. R.; LEITE JÚNIOR, J. M.; BARBOSA, É. A.; NORONHA, S. E.; LEITE, J. R. S. The anurans of Terra Ronca State Park, municipality of São Domingos, state of Goiás, Central Brazil. **Sitientibus Série Ciências Biológicas**, v. 8, n. 2, p. 197-202. 2008.

SIQUEIRA-NETO, M.; POPIN, G. V.; PICCOLO, M. C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CAMARGO, P. B.; BERNOUX, M. Impacts of land use and cropland management on soil organic matter and greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 6, p. 1065-1080. 2020.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for carbon sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2099-2103. 2000.

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. A4-A9. 2014.

SOARES, S.; SOUZA, W.; HOMEM, B.; RAMALHO, I.; BORRÉ, J.; PEREIRA, M.; PINHEIRO, É.; MARCHÃO, R.; ALVES, B.; BODDEY, R.; URQUIAGA, S. The use of integrated crop-livestock systems as a strategy to improve soil organic matter in the Brazilian Cerrado. **Agronomy**, v. 14, n. 11. 2024.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 13. ed. Washington: USDA-NRCS. 2022.

SOUZA, C. M. A.; SUÁREZ, A. H. T.; ARCOVERDE, S. N. S.; ARMANDO, E. J.; MACIAK, P. A. G. Least limiting water range in Oxisol under two conservation tillage systems in sugarcane farming. **Revista Ceres**, v. 69, n. 5. 2022.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; SÁENZ, C. M. S. Spatial variability of aggregate stability in latosols under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 245-253. 2009.

STEVENS, P. R.; WALKER, T. W. The chronosequence concept and soil formation. **The Quarterly Review of Biology**, v. 45, n. 4, p. 333-350. 1970.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 429-438. 2011.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; ALVES, M. C.; REICHERT, J. M. Critical limits for soybean and black bean root growth based on macroporosity and penetrability. **Sustainability**, v. 14, n. 5. 2022.

TAYLOR, H. M.; RATLIFF, L. F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. **Soil Science**, v. 108, n. 2, p. 113-119, 1969.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TEMME, A. J. A. M.; LANGE, K. Pro-glacial soil variability and geomorphic activity – the case of three Swiss valleys. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 11, p. 1492-1503, 2014.

TIUTIUNNYK, H. O. Formation of environmentally friendly agricultural land as a priority of greening the economy of regional system. **Economic Innovations**, v. 19, n. 2, p. 298-302, 2017.

TORRES, J. L. R.; MAZETTO JÚNIOR, J. C.; SILVA JÚNIOR, J.; VIEIRA, D. M. S.; SOUZA, Z. M.; ASSIS, R. L.; LEMES, E. M. Soil physical attributes and organic matter accumulation under no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Research**, v. 57, n. 6, p. 1-10, 2019.

TRABAQUINI, K.; FORMAGGIO, A. R.; GALVÃO, L. S. Changes in physical properties of soils with land use time in the Brazilian Savanna environment. **Land Degradation & Development**, v. 24, n. 6, p. 1-10, 2013.

TRABAQUINI, K.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; ARAGÃO, L. E. O. E. C. de. Soil, land use time, and sustainable intensification of agriculture in the Brazilian Cerrado region. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 2, 2017.

VALENCIA, V. A. M.; CASAS, A. F.; PINTO, D. J. M.; ROSAS-LUIS, R. Modeling soil organic carbon dynamics across land uses in tropical Andean ecosystems. **Land**, v. 14, n. 12, 2025.

VALPASSOS, M. A. R.; CAVALCANTE, E. G. S.; CASSIOLATO, A. M. R.; ALVES, M. C. Effects of soil management systems on soil microbial activity, bulk density and chemical properties. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 12, p. 1445-1452, 2001.

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. 5, p. 892-898, 1980.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; FERNANDES FILHO, E. I. Funções de pedotransferência para estimativa da condutividade hidráulica e umidade do solo no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 12, 2024.

VINHAL-FREITAS, I. C.; FERREIRA, A. S.; CORRÊA, G. F.; WENDLING, B. Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 1, p. 1-9, 2013.

VIZOLI, B.; FERNANDES, C. Organic matter and physical attributes of Latosols 30 months after uses in the sugarcane fallow-period. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 4, 2018.

WELLDY, G. C. T.; ISABEL, D. S. Q.; RISELY, F. A.; FERNANDA, P. M.; MIKHAEL, J. E. R.; ELIAS, N. B. Hydro-physical properties and organic carbon of a yellow oxysol under different uses. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 29, p. 1-10, 2016.

WICKHAM, H. **Ggplot2**: elegant graphics for data analysis. 2. ed. New York: Springer, 2016. 260 p.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

ZALLES, V.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; STEHMAN, S. V.; TYUKAVINA, A.; PICKENS, A.; SONG, X.-P.; ADUSEI, B.; OKPA, C.; AGUILAR, R.; JOHN, N.; CHAVEZ, S. Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 2, p. 428-435, 2018.

ZHAO, J.; CHEN, S.; HU, R.; LI, Y. Soil aggregate stability and its relationship with soil organic carbon and iron-aluminum oxides under different land use types. **Scientific Reports**, v. 7, 40654, 2017.