



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

JOÃO HENRIQUE MELO

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM PLANOSSOLO SOB SISTEMA DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA- PECUÁRIA-FLORESTA NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

**AREIA
2026**

JOÃO HENRIQUE MELO

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM PLANOSSOLO SOB SISTEMA DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA- FLORESTA NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenação do Curso de Agronomia do
Centro de Ciências Agrárias da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito para
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Pereira de
Oliveira

**AREIA
2026**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M528p Melo, João Henrique.

Propriedades físicas de um planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Semiárido brasileiro / João Henrique Melo. - Areia:UFPB/CCA, 2026.

51 f. : il.

Orientação: Flávio Pereira de Oliveira.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Estruturação do solo. 3. Sistemas integrados. 4. Semiárido. 5. Sustentabilidade. I. Oliveira, Flávio Pereira de. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)

JOÃO HENRIQUE MELO

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM PLANOSSOLO SOB SISTEMA DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA- FLORESTA NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

Trabalho de conclusão de curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Paraíba como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

APROVADO EM: 02/12/2025

BANCA EXAMINADORA:

Assinatura: 
Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira
(Orientador) - UFPB

Assinatura:  Documento assinado digitalmente
BRUNO DE OLIVEIRA DIAS
Data: 05/02/2026 06:23:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>
Prof. Dr. Bruno de Oliveira Dias
(Examinador) -UFPB

Assinatura:  Documento assinado digitalmente
RAMON FREIRE DA SILVA
Data: 04/02/2026 14:56:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>
Eng. Agr. Dr. Ramon Freire da Silva
(Examinador) - UFPB

Dedico este trabalho a minha avó, Maria de Lourdes Filha (in memorian), a minha família e a todos os amigos, pelo carinho, apoio e estímulo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador do universo e da vida, pela dádiva da fé, da força e da resiliência que carrego comigo para que conseguisse alcançar os meus objetivos.

À Universidade Federal da Paraíba e ao Centro de Ciências Agrárias por contribuir com a minha formação profissional e pessoal, concedendo conhecimento, experiência e apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de iniciação científica (PIBIC), para que inúmeros trabalhos pudessem ser realizados.

À Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), alocada na cidade de Alagoinha, PB pela disponibilidade da área de estudo e desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pela pesquisa que foi financiada por meio do Termo de Outorga Nº 050/2023, Protocolo Nº 55472.923.31713.27102022 - EDITAL Nº 19/2022 PROGRAMA DE APOIO A CENTROS EM CONSOLIDAÇÃO DO ESTADO DA PARAIBA referente ao projeto “Consolidação de um sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta: uma alternativa para produção sustentável no Semiárido Brasileiro”.

Ao professor e orientador Dr. Flávio Pereira de Oliveira, por toda orientação nos experimentos e ensaios, conhecimento compartilhado, confiança depositada a mim nas atividades e paciência, que além de um exemplo profissional, também é um homem bondoso e inspirador, ao qual serei eternamente grato por tudo.

À minha família, em especial à minha avó Maria de Loures Filha (*in memorian*) e ao meu tio Ivan Gomes Ventura (*in memorian*), por todo amor, dedicação, carinho e educação que me deram, pois tudo que sou é reflexo do que me ensinaram e me sinto privilegiado por Deus ter escolhido vocês, serei eternamente grato. Essa vitória é nossa.

À minha mãe Maria Isabel Cristina Melo, pelo amor e carinho incondicional, por sempre apoiar e acreditar em mim, mesmo distante e por passar tanto tempo longe. O seu amor por mim é inexplicável e imensurável. Obrigado minha mãe.

Às minhas irmãs Paloma, Samara e Luana por todo amor, cuidado, conselhos e orações dedicadas a mim, tudo que vivemos juntos e sentimos um pelos outros é recíproco. Grande parte da minha criação e educação eu também devo a vocês e sempre serei grato. Sempre será nós quatro e vovó.

Às minhas tias/madrinhas Márcia Andreia e Marluce pelo carinho, apoio e incentivo a estudar e correr atrás dos meus objetivos, sem vocês essa jornada da vida e acadêmica teria sido muito mais difícil, mas dou graças a Deus que tive e tenho vocês.

Aos meus tios/padrinhos Fabian Ventura e Francisco Neves (Chico) pelas conversas e incentivos para que eu corresse atrás dos meus objetivos, e por sempre estarem me aconselhando a ser um homem de respeito, caráter e manter a humildade com todos, agradeço de coração a vocês.

Aos cunhados Dudu e Júnior pelos conselhos, apoio e ajuda sempre que precisei, só tenho a agradecer a vocês. Aos sobrinhos Mateus e Pedro pelo carinho e respeito.

Aos meus primos queridos Yannick, Melina, Gean, Gel, Ícaro e todos os demais, pelos momentos em família que me fortaleceram a cada volta pra casa, sou grato por tudo e por todos.

À minha namorada, Vanessa Maria, pelo amor, carinho, dedicação, respeito, paciência e cuidado, sendo uma pessoa incrível na qual tive a sorte de conhecer no meio da jornada acadêmica, a qual tenho uma profunda admiração pela sua fé, determinação e coração bondoso. Que me ensina a ser uma pessoa melhor e que sempre está do meu lado, apoiando, incentivando e sonhando juntos, serei eternamente grato.

Aos meus sogros, Gilvanda e Manoel, que me acolheram e me fizeram me sentir em casa, mesmo longe da minha casa, sou grato demais. Perto de vocês eu me sinto acolhido e querido.

Aos meus amigos de São Sebastião do Umbuzeiro: Wanderson, Marcos, Israel, Erika, Jefferson (professor), Jefinho, Alan Barcelar, Francisco Antônio (Toin de tete) e Danilo Correia pelos conselhos, incentivo e companheirismo antes e ao longo da jornada acadêmica, mesmo com a distância, sempre me incentivando a progredir e crescer, gratidão sempre a vocês.

Aos amigos Ênio Meneses, João Alexandrino, Lourival Júnior, Rodrigo Domingos e Wellington Melo pela amizade, incentivo e conselhos durante a caminhada acadêmica, para que eu me tornasse um profissional competente. Todos vocês sempre foram e serão exemplos de homens e profissionais de excelência, aos quais me inspiro todos os dias. Gratidão por tudo.

Aos amigos do Pernambuco: Paulão, Kaue, Felipe, Karol e Ian pela amizade, consideração e pelos bons momentos que tivemos. Grato pela parceria, juntos sempre seremos melhores.

Ao Luiz Fernando, verdadeiro amigo/irmão que desde o início da graduação esteve comigo, me ajudando nos conteúdos e compartilhando todos os momentos. Uma das pessoas mais importantes na minha graduação, a qual tenho uma imensa admiração e carinho. Sem dúvida

alguma, a caminhada universitária com você foi incrível, com toda certeza, a vida profissional também será. A você sou e serei imensamente grato, pela amizade sincera e verdadeira.

À Mariana Tamires, uma amiga e parceira que tive a alegria de encontrar no início da graduação, sempre me salvando nos conteúdos, puxando me orelha e me acompanhando em todos os momentos. Uma pessoa incrível, de um coração bondoso e puro e sempre disposta a ajudar. Sou imensamente grato pela sua presença e amizade nessa jornada.

Aos amigos do bloco F-4 térreo e agregados: Wendel, Osnar, Aurélio, Wellington, Lucas, Andrey, Gabriel, Pedro, Germano, Arthur e Gabriel pelos bons momentos reunidos, boas conversas, ajudas, conselhos e compreensão. Sou grato a cada um por dividir o bloco e a rotina com companheirismo e empatia, ajudando a tornar todos os anos no alojamento mais tranquilos e divertidos. Gratidão meus amigos.

A todos os amigos do CCA, em especial à Jackeline Germano, à Sara Rafaela, à Maria Luiza, o Gustavo Amorim, à Hellen Ramos, à Beatriz Azevedo, o Marcos Almeida, o José Arthur, o Robson, à Thalita Martins, o José Vinícius, o Bruno Bondade, o Gabriel Soares, o João Victor Sanges, o Ian Felipe e todos os demais pela amizade construída ao longo da graduação. Ninguém constrói uma história sozinho. Cada um de vocês foram, são e sempre serão importantes para mim. Gratidão meus amigos.

A todos os professores da UFPB, em especial ao meu primeiro orientador Milton César, ao diretor do CCA Bruno Dias, Valdemir, Ariadne, Valéria, Rejane, Aline, Leossávio¹ e todos os outros que compartilharam seus conhecimentos e experiências com paciência e dedicação, aos técnicos Ramon Freire, Robeval Diniz e Rodolfo por sempre estarem dispostos a ajudar. Gratidão a todos.

A todos os servidores do CCA, que proporcionam condições essenciais para que a formação acadêmica e profissional aconteça, aos quais tenho muito respeito e admiração por todos, agradeço de coração. O esforço de todos é de muita valia para todos os estudantes. Gratidão eterna.

*“Adquirir a sabedoria vale mais que o ouro;
antes adquirir a inteligência que a prata”.*

Provérbios 16:16

RESUMO

O sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) surge como alternativa eficiente para recuperação de áreas degradadas, por meio do manejo sustentável dos solos, combinando espécies florestais, culturas agrícolas e animais de produção em uma organização adequada de tempo e espaço. Nesse contexto, objetivou-se avaliar e analisar as propriedades físicas de um Planossolo sob ILPF na região semiárida do Agreste paraibano. A pesquisa foi conduzida em área localizada na Estação Experimental da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária – EMPAER, no município de Alagoinha, PB. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC) com seis sistemas de uso do solo: T1) Gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (GC + BD); T2) Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (SB + BD); T3) Milho (*Zea mays* L.) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (ML + BD); T4) *Brachiaria decumbens* Stapf. (BD); A área de Vegetação Nativa (T5) e área de Pastagem considerada degradada (T6) em três profundidades (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), com quatro repetições. Amostras de solo com estrutura indeformada foram coletadas em três camadas para a determinação das seguintes características físicas: textura, densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi), condutividade hidráulica saturada ($K\theta$) e resistência a penetração (Rp). Após 10 anos de implementação do sistema de integração, não foi possível identificar diferenças significativas para os sistemas de uso do solo entre si e entre profundidades para as propriedades estudadas. Percebe-se uma relação significativa entre a porosidade total com os demais atributos avaliados. Houve modificações nas características físicas do solo, resultado do manejo animal inadequado. A vegetação nativa, apresenta a menor densidade e resistência à penetração, maior porosidade, apesar da condutividade hidráulica apresentar valores um pouco inferior. Os tratamentos SB+BD e GL+BD nas três profundidades demonstram potencial de melhoria da estrutura física do solo, reduzindo a densidade e resistência a penetração e melhorando porosidade, aeração e infiltração de água no solo.

Palavras-chave: estruturação do solo; sistemas integrados; semiárido; sustentabilidade.

ABSTRACT

The integrated crop-livestock-forestry (ICLF) system emerges as an efficient alternative for the recovery of degraded areas, through the sustainable management of soils, combining forest species, agricultural crops, and livestock in an appropriate organization of time and space. In this context, the objective was to evaluate and analyze the physical properties of a Planosol under ICLF in the semi-arid region of the Paraíba Agreste. The research was conducted in an area located at the Experimental Station of the Paraíba Company for Research, Rural Extension and Land Regularization – EMPAER, in the municipality of Alagoinha, PB. The experimental design used was randomized blocks (RBD) with six land use systems: T1) *Gliricidia* (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (GC + BD); T2) *Sabiá* (*Mimosa caesalpinhiifolia* Benth.) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (SB + BD); T3) Corn (*Zea mays* L.) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (ML + BD); T4) *Brachiaria decumbens* Stapf. (BD); The native vegetation area (T5) and the area of pasture considered degraded (T6) were studied at three depths (0.00-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m), with four repetitions. Undisturbed soil samples were collected in three layers to determine the following physical characteristics: texture, soil density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), saturated hydraulic conductivity ($K\theta$), and penetration resistance (Rp). After 10 years of implementing the integrated system, it was not possible to identify significant differences between the land use systems and between depths for the properties studied. A significant relationship was observed between total porosity and the other evaluated attributes. There were changes in the physical characteristics of the soil, resulting from inadequate animal management. The native vegetation presents the lowest density and resistance to penetration, and the highest porosity, although the hydraulic conductivity shows slightly lower values. The SB+BD and GL+BD treatments at the three depths demonstrate potential for improving the physical structure of the soil, reducing density and resistance to penetration and improving porosity, aeration, and water infiltration.

Keywords: soil structuring; integrated systems; semi-arid; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de degradação de áreas de pastagem ao longo de diversas fases e períodos	17
Figura 2 - Componentes e combinações dos sistemas de integração.	18
Figura 3 - Integração Lavoura-Pecuária (ILP)	19
Figura 4 - Integração Lavoura-Floresta (ILF)	19
Figura 5 - Integração Pecuária-Floresta (IPF)	20
Figura 6 - Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)	20
Figura 7 - Gráfico da utilização dos modelos de sistemas integrados	25
Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo na Unidade Referencial de Transferência de tecnologia URT em Alagoinha no Semiárido Brasileiro	27
Figura 9 - Áreas de ILPF (A), Floresta Nativa (B) e Pastagem Convencional (C)	28
Figura 10 - Amostras indeformadas coletadas em pontos específicos de cada parcela experimental.....	29
Figura 11 - Laboratório de Análises Físicas de Solo no DSENGR.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Textura e grau de floclulação em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura–Pecuária–Floresta, Vegetação Nativa e Pastagem Convencional no Agreste da Paraíba.....	33
Tabela 2 - Densidade (DS), Porosidade total (PT), Microporosidade (MI), Macroporosidade (MA), Condutividade hidráulica (K θ) e Resistência à Penetração (RP).....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPAER	Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária
FAPESQ	Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba
DSENGR	Departamento de Solos e Engenharia Rural
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
SIPA	Sistemas Integrados de Produção Agropecuária
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
URT	Unidade Referencial de Transferência de Tecnologia
ABC	Agricultura de Baixa Emissão de Carbono
CCA	Centro de Ciências Agrárias
ILP	Integração Lavoura-Pecuária
ILF	Integração Lavoura-Floresta
IPF	Integração Pecuária-Floresta
MOS	Matéria Orgânica do Solo
K _θ	Condutividade Hidráulica
PC	Pastagem Convencional
RP	Resistência à Penetração
SAF	Sistema Agroflorestal
BD	<i>Brachiaria decumbens</i>
GF	Grau de Floculação
DS	Densidade do Solo
VN	Vegetação Nativa
MA	Macroporosidade
MI	Microporosidade
PT	Porosidade Total
MPa	Mega Pascal
GL	Gliricídia
MI	Milho
SB	Sabiá

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Degradação física do solo nos sistemas convencionais de agricultura e pecuária	16
2.2 Sistemas integrados de produção agropecuária	18
2.3 Efeitos da adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária na melhoria física do solo	21
2.4 Indicadores físicos do solo sugeridos como fatores para avaliar sua qualidade.....	22
2.5 Estudos/pesquisas com ILPF	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Localização e caracterização da área experimental	27
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	28
3.3 Coleta e preparo das amostras	29
3.4 Variáveis analisadas	30
3.4.1 Físicas.....	30
3.4.2 Análise estatística	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O solo é a base primordial para as plantas, atuando como suporte físico e, ao mesmo tempo, fornecendo os nutrientes essenciais ao seu crescimento. Ademais, fornece água, ar e outros componentes essenciais ao crescimento vegetal (Tezolin *et al.*, 2021). Assim, a qualidade do solo é entendida como a sua habilidade de desempenhar várias funções, e isso pode ser observado através da análise dos atributos físicos, químicos e biológicos (Bongiorno *et al.*, 2019).

A exploração intensiva dos recursos naturais e o aumento da necessidade da produção de alimentos comprometem não apenas a produção agropecuária, mas também reduzem a capacidade do solo de sustentar seus serviços ecossistêmicos essenciais (Nascimento *et al.*, 2019).

Através das interações entre o solo e a água, diversos serviços ecossistêmicos são gerados, consequentemente, associados aos processos de infiltração e recarga de aquíferos, ao escoamento superficial da água no solo, à transferência hídrica para as plantas, à provisão de alimentos, à evapotranspiração, à manutenção da umidade e da biodiversidade do solo, bem como à ciclagem e ao transporte de nutrientes, ao estoque de carbono e a outros componentes (Prado *et al.*, 2022).

Cerca de 95% da produção global de alimentos dependem do solo, isso explica porque as práticas agrícolas insustentáveis não podem existir (FAO, 2022). Dessa forma, a diminuição da produtividade e da fertilidade natural do solo afeta a produção de alimentos que precisa atender a uma demanda que deverá aumentar em aproximadamente 60% até 2050 (FAO, 2023).

A região Semiárida do Nordeste brasileiro, apresenta inúmeras propriedades rurais de pequeno porte que frequentemente são manejadas de forma inadequada, levando ao esgotamento dos recursos naturais e à degradação das áreas (Alves *et al.*, 2022). Tal dinâmica contribui para a abertura de novas fronteiras, além de promover processos de degradação ambiental, perda da biodiversidade nas áreas abandonadas e o desencadeamento do fenômeno da desertificação (Vieira *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a instabilidade climática caracterizada por altas temperaturas e baixo volume de precipitação associada às técnicas de manejo do solo intensivas, intensifica a pressão sobre os sistemas de produção agropecuária agravando o processo de degradação ambiental (Nóbrega, 2020). Esses fatores são os principais obstáculos para a produtividade da agropecuária na região semiárida do país (Alves *et al.*, 2022).

Assim, a necessidade de evitar ou atenuar a degradação do solo leva à adoção de

sistemas de produção que permitam preservar ou aprimorar o equilíbrio entre os componentes solo-planta-animal elevando a eficiência de uso desses elementos (Schembergue *et al.*, 2017). Portanto, é importante implementar práticas agrícolas que promovam a otimização dos ciclos biológicos das plantas e dos animais, bem como melhorar a eficiência no aproveitamento dos insumos utilizados (Martins *et al.*, 2021).

Nesse contexto, práticas conservacionistas como o sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) surgem como alternativa eficiente para recuperação de áreas degradadas, por meio do manejo sustentável dos solos (Soares *et al.*, 2020), combinando culturas agrícolas, animais de produção e espécies florestais na mesma área em uma organização adequada de tempo e espaço, almejando benefícios mútuos para todas as atividades envolvidas (Pulrolnik *et al.*, 2019).

O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta proporciona benefícios como a formação e estabilização dos agregados do solo, aumento da permeabilidade, estímulo ao crescimento das raízes e preservação da matéria orgânica (Costa *et al.*, 2012). Além disso, facilita a ciclagem de nutrientes, aprimora as qualidades físicas do solo e contribui para uma agricultura mais produtiva e sustentável, superando os métodos tradicionais de cultivo (Loss *et al.*, 2014; Faccin *et al.*, 2016).

Sendo assim, manter a qualidade do solo ou até mesmo obter melhorias através de sistemas de produção sustentáveis tornam-se imprescindíveis para elevar a segurança alimentar e nutricional sem comprometer o equilíbrio entre as condições físicas, químicas e biológicas do solo (Santos *et al.*, 2019).

Pesquisas sobre sistemas de integração agropecuária no Brasil têm mostrado resultados satisfatórios (de Sene, 2021), mas há uma falta de informações na literatura sobre o impacto da adoção do sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta na qualidade física do solo no Nordeste (Silva, 2019). Portanto, é fundamental a realização de estudos destinados à definição de parâmetros físicos do solo que subsidiem a implementação de sistemas integrados em regiões semiáridas do Brasil.

A hipótese é que o Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta promova a recuperação física do Planossolo Háplico no Semiárido Brasileiro, após quase dez anos de implementação, apresentando indicadores de porosidade e agregação superiores aos da pastagem convencional e próximos aos da vegetação nativa.

Diante do exposto, objetivou-se analisar e identificar indicadores de qualidade do solo relacionados as propriedades físicas de um Planossolo Háplico sob um sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Semiárido Brasileiro, após dez anos de implementação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Degradação física do solo nos sistemas convencionais de agricultura e pecuária

À nível global, estima-se que pelo menos 24% das terras agrícolas estão degradadas devido ao uso intensivo, com futuras projeções de aumento nos próximos anos (Adão *et al.*, 2025). Com isso, o método tradicional de preparo do solo, combinado com práticas que adotam manejos inadequados, além do cultivo de uma única cultura (monocultivo), frequentemente resulta em baixa produtividade, degradação do solo e esgotamento dos recursos naturais (Lourençano e Cavichioli, 2019). Com o aumento constante da demanda por alimentos, a prática do monocultivo tem se tornado ainda mais intensificada.

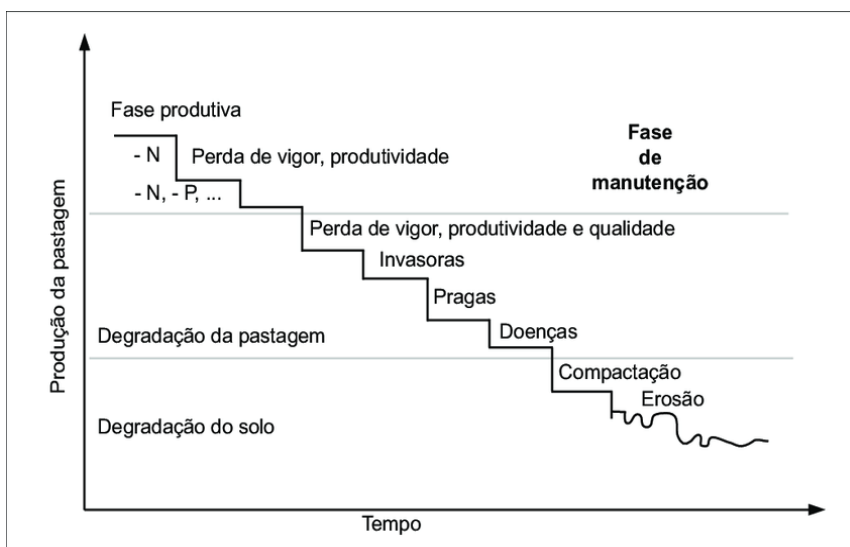
Dessa forma, a degradação física do solo é um dos fatores mais importantes na produção agrícola e pecuária, pois está relacionada a processos que são essenciais para o crescimento das plantas, tanto os mais estáticos quanto os dinâmicos (Silva, 2019). O uso inadequado do solo é uma das principais causas de compactação, o que dificulta bastante a produtividade agrícola, principalmente em sistemas convencionais, tornando mais difícil realizar as tarefas no campo (Sabino, 2023).

No processo de compactação, ocorre a diminuição da quantidade de macroporos, que são espaços de maior dimensão responsáveis pela circulação de ar e infiltração de água. Isso aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração das raízes, prejudicando a distribuição de ar e água no solo (Collares *et al.*, 2006). Como consequência, a capacidade do solo de absorver e reter água diminui, podendo afetar o crescimento das plantas e comprometer o desenvolvimento das raízes (Santos *et al.*, 2018).

Desse modo, a degradação das pastagens pode ser entendida como um processo no qual estas perdem vigor, produtividade e capacidade de se recuperar naturalmente (Macedo, 1999) (Figura 1). Isso faz com que fiquem incapazes de manter os níveis de produção e a qualidade dos alimentos que os animais precisam, mesmo que o crescimento ainda aconteça em épocas mais favoráveis ao crescimento (Rocha, 2021).

De acordo com Macedo *et al.* (2019), as principais causas associadas à degradação de pastagens incluem a formação inicial inadequada, decorrente da ausência ou má aplicação de práticas de conservação e preparo do solo; o manejo animal inadequado, caracterizado por excesso de lotação e sistemas de pastejo inadequados; e a falta ou aplicação incorreta de práticas de conservação e manutenção da fertilidade do solo durante a condução do sistema.

Figura 1 – Processo de degradação de áreas de pastagem ao longo de diversas fases e períodos



Fonte: Macedo (1999)

Assim, com base na estrutura do solo, é possível identificar diferentes tipos de impedimentos físicos que dificultam o crescimento das plantas. Pesquisas mostram que, em solos que estão degradados fisicamente, uma das principais restrições é a resistência do solo à penetração, que limita o desenvolvimento das raízes e, consequentemente, o crescimento das plantas acima do solo (Collares *et al.*, 2006).

No Semiárido Brasileiro, a ocupação desordenada do solo aliada a práticas de manejo inadequadas em áreas de relevo acidentado tem levado à ocorrência de processos de erosão e à degradação do solo de forma significativa (Sousa *et al.*, 2023). A Paraíba, de acordo com a mais recente delimitação apresenta 198 municípios integrantes do Semiárido Brasileiro (Costa Filho, 2025).

Para evitar ou amenizar esse prejuízo, é importante que na fase de planejamento do plantio sejam criadas condições estruturais que favoreçam o desenvolvimento das plantas, tanto na parte aérea quanto nas raízes (Bottega *et al.*, 2011; Cortez *et al.*, 2018). Assim, uma alternativa sustentável para reduzir a degradação do solo em regiões semiáridas é o uso dos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), como a integração Lavoura-Pecuária-Floresta (Sousa Neto *et al.*, 2024).

Esses sistemas aumentam a produção de alimentos, fibras, energia e água, sendo mais sustentável do que os sistemas convencionais de produção (Assis *et al.*, 2017). Por isso, é importante incentivar o uso de práticas de produção que sejam sustentáveis, buscando um equilíbrio solo-planta-animal.

2.2 Sistemas integrados de produção agropecuária

O sistema de integração é uma estratégia utilizada para promover uma produção agropecuária mais sustentável. Nesse método, segundo Balbino *et al.* (2011), as atividades agrícolas, pecuárias e florestais são realizadas em rotação, consórcio ou sucessão na mesma área, podendo ocorrer durante o mesmo ano agrícola ou ao longo de vários anos, com alternâncias ou sequências. Assim, é possível combinar os componentes de diferentes formas para encontrar a associação que melhor se adapta ao local, considerando o tipo de solo e o clima da região (Cordeiro *et al.*, 2015).

De acordo com a Embrapa (2019), os sistemas integrados de produção agropecuária podem ser feitos combinando dois ou até três componentes (Figura 2) e o seu propósito principal é otimizar a utilização do solo, promover a preservação ambiental e assegurar a viabilidade econômica das operações agrícolas (Goiano, 2020).

Figura 2 – Componentes e combinações dos sistemas de integração



Fonte: Rede ILPF (2020)

A Integração Lavoura-Pecuária (ILP), também conhecida como sistema agropastoril, combina atividades agrícolas, como o cultivo de grãos ou pastagens com a criação de gado de corte ou leite. Essa integração pode acontecer de várias maneiras: em rotação, em consórcio ou por sucessão na mesma área e ao longo do tempo (Figura 3). Essa prática ajuda a otimizar o uso do solo, permitindo produzir grãos em áreas de pastagem e aumentando a produtividade das pastagens, que se renovam com a adubação residual da lavoura. Assim, há uma maior circulação de nutrientes e um aumento na matéria orgânica do solo na área (Assis *et al.*, 2019; Embrapa, 2019).

Figura 3 – Integração Lavoura-Pecuária (ILP)



Fonte: Embrapa Agrossilvipastoril, (2020)

Na Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Silviagrícola, integra o componente agrícola e florestal pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas anuais ou perenes, conforme (Figura 4). Nesse sistema, as árvores são plantadas entre as linhas das culturas ajudando a incrementar certa quantidade de matéria orgânica no solo e gerar biomassa foliar, o que beneficia o solo e promove um sistema mais sustentável. (Assis *et al.*, 2019; Embrapa, 2019).

Figura 4 – Integração Lavoura-Floresta (ILF)



Fonte: Embrapa Agrossilvipastoril, (2020)

Na Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril, une a criação de animais e a produção de floresta em um mesmo sistema (Figura 5). Nesse caso, as árvores escolhidas geralmente são aquelas que oferecem bom retorno financeiro e apresentam menor risco de serem prejudicadas pelo gado, como eucalipto, cedro australiano ou mogno africano entre outras espécies. (Vilela *et al.*, 2015; Embrapa, 2019).

Figura 5 – Integração Pecuária-Floresta (IPF)



Fonte: Embrapa Amazônia Oriental, (2017)

O Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) combina três componentes: agricultura, pecuária e floresta (Figura 6). O objetivo é otimizar os ciclos biológicos das plantas e dos animais. Assim, aproveita melhor os recursos, reduz o uso de insumos e minimiza impactos ambientais (Assis *et al.*, 2019; Embrapa, 2019).

Figura 6 – Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)



Fonte: Embrapa Agrossilvipastoril, (2020)

No Nordeste brasileiro, esses sistemas têm avançado bastante, especialmente considerando as condições climáticas da região. Segundo dados da Rede ILPF (2020), atualmente há cerca de 2 milhões de hectares com sistemas integrados de produção na região Nordeste, sendo que a Paraíba se destaca com aproximadamente 207.050 mil hectares.

Ainda, de acordo com a Rede ILPF (2020), entre os inúmeros benefícios já

comprovados pela pesquisa científica, os sistemas de integração contribuem para a redução do impacto ambiental, elevação de rentabilidade para o produtor rural, possibilitam a recuperação de pastagens degradadas e improdutivas, bem como reduzem o risco financeiro.

Segundo Nóbrega (2020), a combinação de componentes vegetais, animais e florestais demonstra eficiência técnica e compatibilidade ambiental. Entretanto, sua implementação requer precisão para garantir resultados satisfatórios. O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta apresenta alta versatilidade e tem sido amplamente empregado na recuperação de pastagens degradadas ou em áreas de baixa produtividade (Kichel *et al.*, 2012).

Apesar do aumento no número de estudos e aplicações, o conhecimento sobre os sistemas de integração ainda é incipiente, sendo imprescindível a divulgação e a realização de novas pesquisas para o desenvolvimento de modelos da ILPF adaptados aos diferentes cenários brasileiros (Rodrigues *et al.*, 2019).

2.3 Efeitos da adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária na melhoria física dos solos

A qualidade do solo pode ser analisada de acordo com algumas variáveis que estão relacionadas à sua forma e estabilidade, a qual algumas propriedades físicas como estrutura e agregação solo estão entre os parâmetros mais sensíveis a depender do manejo adotado (Tavares Filho *et al.*, 2010). Para que esses atributos estejam em conformidade, um dos principais pilares é a matéria orgânica, a qual precisa exercer o seu papel.

A matéria orgânica do solo possui frações importantes que contribuem para o condicionamento dos atributos físicos, como as substâncias húmicas (Baldotto, 2015), biomassa microbiana (Conceição *et al.*, 2017) e fração leve, as quais auxiliam no armazenamento de água e contribuem para estabilização de agregados e a ação cimentante dos agentes biológicos (Figueiredo *et al.*, 2018). Além de promover a manutenção da macro e meso fauna que atuam nas propriedades físicas do solo servindo de canais de preferência para o crescimento radicular (Sabino, 2023).

A combinação de gramíneas e árvores no sistema resulta em aumento significativo na quantidade de resíduos vegetais, o que também eleva o teor de carbono orgânico (Torres *et al.*, 2018) e promove melhorias na qualidade física do solo. Esse efeito está relacionado à melhora na qualidade física do solo, demonstrada pelo aumento no volume total de poros e na formação de agregados, conforme Loss *et al.* (2014).

Gontijo Neto *et al.* (2013) ressaltam que o componente arbóreo desempenha papel

importante na reciclagem de nutrientes, na formação de um microclima favorável e na proteção contra processos erosivos, assim como as gramíneas, com destaque para o gênero *Brachiaria* (*B. brizantha* ou *B. decumbens*), reconhecidas por sua resistência ao sombreamento e elevado valor nutricional (Macedo *et al.*, 2020). Em relação as leguminosas, como a leucena (*Leucea leucocephala*), Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*), Gliricídia (*Gliricidia sepium*), estas contribuem para a fixação biológica de nitrogênio e melhoram a qualidade do solo, como destaca Almeida *et al.* (2018).

Outrossim, a contribuição das plantas ao solo envolve o desenvolvimento do sistema radicular, que fragmenta as camadas compactadas, deslocando partículas do solo para facilitar sua passagem (Matos e Bassaco, 2023). Ademais, as plantas atuam como corredores ecológicos, viabilizando o fluxo gênico entre fragmentos florestais e oferecendo habitat para polinizadores e fauna silvestre (Kluthcouski *et al.*, 2020).

Além disso, o sistema ILPF promove o aperfeiçoamento e o aumento da ciclagem dos nutrientes do solo, reduzindo a perda de nutrientes por erosão (Campos *et al.*, 2024). Essa prática também contribui para a conservação dos recursos hídricos e da biodiversidade, além de auxiliar na fixação de carbono (Behling *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o sistema ILPF apresenta um grande potencial para propor soluções que favorecem melhorias na estruturação do solo e a manter sua fertilidade natural, contribuindo para uma agricultura sustentável (Dantas *et al.*, 2012). Assim, tem se percebido que nas regiões onde há sistemas integrados de produção agropecuária, a qualidade do solo costuma ser melhor do que nas áreas de monocultivo (Loss *et al.*, 2012).

2.4 Indicadores físicos do solo sugeridos como fatores para avaliar a sua qualidade

Quando avaliamos a qualidade do solo, é importante observar atributos mais sensíveis que refletem a sua capacidade de funcionamento (Bünemann *et al.*, 2018). Avaliar a qualidade física do solo requer o exame de sua textura, densidade, porosidade total (macro e microporos), além da resistência à penetração e da condutividade hidráulica (Rodrigues *et al.*, 2016).

A textura do solo refere-se à característica física que resulta da proporção relativa das partículas primárias, como areia, silte e argila, presentes na fração mineral do solo. Essa proporção influencia a resistência do solo, o movimento da água, a facilidade de trabalhar com o solo e também os processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes e a troca de íons (Stefanoski *et al.*, 2013).

Além disso, por ser uma propriedade pouco alterada pelo manejo, não é um indicador

recomendado para comparar sistemas de manejo do solo (Cherubin *et al.*, 2016), sendo o volume de poros, a densidade do solo, a resistência à penetração e a condutividade hidráulica saturada que melhor representam os indicadores físicos para o crescimento radicular das plantas e da disponibilidade hídrica no solo, os quais apresentam alterações relevantes (Carter, 2006).

A densidade do solo é resultado da relação entre a massa de solo seco e o volume de espaços vazios (poros) ocupados no solo (De Oliveira Silva *et al.*, 2020), e pode ser influenciada por diversos fatores como: tipo de cobertura vegetal, os resíduos na superfície do solo e a quantidade de matéria orgânica no solo. Esses elementos impactam na qualidade física do solo diante das ações do clima externo (Ferreira, 2016).

Para Almeida *et al.* (2016), esse parâmetro constitui um indicador eficiente da qualidade do solo, devido à sua elevada sensibilidade às práticas de manejo e à sua associação direta com diversas propriedades físico-hídricas do solo.

Nesse cenário, ao estudar a dinâmica da água no solo, a condutividade hidráulica saturada geralmente é considerada como uma variável de avaliação, podendo ser medida tanto em ambientes de campo quanto em laboratórios (Trevisan *et al.*, 2009). Trata-se de uma propriedade dinâmica que mantém correlação com diversos atributos físicos do solo, incluindo a estrutura, textura, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo (Brady, 1983).

A forma como a superfície do solo está organizada e suas características físicas ao longo do perfil têm um impacto importante na maneira como a água consegue infiltrar no solo (Gonçalves e Moraes, 2012; Santos *et al.*, 2014). Durante o processo de percolação, a taxa de infiltração tende a atingir um valor constante, indicando o momento em que o solo atinge a saturação (Vilarinho *et al.*, 2019).

Além da taxa de infiltração, a porosidade do solo encontra-se intimamente relacionada ao seu desempenho, uma vez que atua em conjunto com a textura e as estruturas apresentadas. Essa relação exerce uma influência significativa sobre aspectos como a drenagem, a capacidade de retenção de água no perfil e a aeração do solo (Carmo *et al.*, 2018).

A porosidade do solo é crucial para o seu desempenho, pois está ligada a textura e as estruturas do solo, afetando de maneira significativa a drenagem, a retenção de água no perfil e a circulação de ar (Carmo *et al.*, 2018). Dessa forma, entender a porosidade total é fundamental para compreender o movimento da água, do ar e dos solutos no solo, além de outros fatores relevantes (Almeida *et al.*, 2017).

Os macroporos representam a macroporosidade do solo e são responsáveis pelo transporte de água e aeração do solo, enquanto os microporos correspondem à microporosidade do solo, possuindo capacidade de retenção hídrica que favorece o armazenamento de água no perfil do solo (Reichardt e Timm, 2012).

O entendimento dessas propriedades é fundamental para a manutenção de solos agrícolas, uma vez que a compactação causada pelo tráfego de máquinas pesadas e animais reduz a porosidade do solo, influenciando processos como a infiltração de água e o balanço hídrico (Silva *et al.*, 2020).

A resistência à penetração (RP) constitui um parâmetro relevante na avaliação do solo devido à sua influência no desenvolvimento vegetal (Duarte *et al.*, 2019), bem como no transporte e armazenamento de água no perfil do solo (Silva *et al.*, 2020).

Assim, a investigação da resistência à penetração revela-se de interesse científico, uma vez que níveis elevados desse atributo podem dificultar o crescimento e a expansão do sistema radicular das plantas, resultando em redução de produtividade agrícola (Silva *et al.*, 2012).

Para Reichert *et al.* (2010), esse atributo diz respeito à compactação do solo, possibilitando a identificação de camadas compactadas e a detecção de alterações nas propriedades físicas do solo ao longo dos horizontes, o que contribui para avaliar a suscetibilidade dos solos aos processos de degradação.

Os indicadores de qualidade do solo são essenciais para garantir que suas condições físicas se mantenham em níveis adequadas, contribuindo para a produtividade agrícola (Cortez *et al.*, 2018). Assim, pode-se implementar sistemas de produção agrícolas que sejam resilientes, adaptáveis e sustentáveis (Silva *et al.*, 2010).

Esses indicadores são atributos que podem ser medidos de forma quantitativa ou qualitativa (Silva, 2019), permitindo avaliar as mudanças que ocorrem em um determinado ecossistema. O conjunto de características mencionadas também influencia na avaliação da qualidade do solo, sendo indispensáveis para apoiar decisões de manejo apropriadas.

2.5 Estudos/pesquisas com ILPF

Segundo Guedes *et al.* (1996), as gramíneas especialmente do gênero Braquiária, têm a capacidade de aprimorar a qualidade físico-hídrica do solo por meio da ação direta de suas raízes na estruturação espacial do solo. Nos sistemas de manejo que empregam gramíneas perenes como plantas de cobertura, observa-se uma ação agregante mais duradoura em comparação às leguminosas, atribuída à presença de um sistema radicular fasciculado, mais

denso e com maior contato com as partículas do solo (Paladi; Mielniczuk, 1991).

Para Balbino *et al.* (2012), a implementação de arranjos de ILPF mais elaborados aumenta a rentabilidade do produtor devido à ampla diversificação de atividades e ao efeito positivo gerado pela combinação de diferentes práticas.

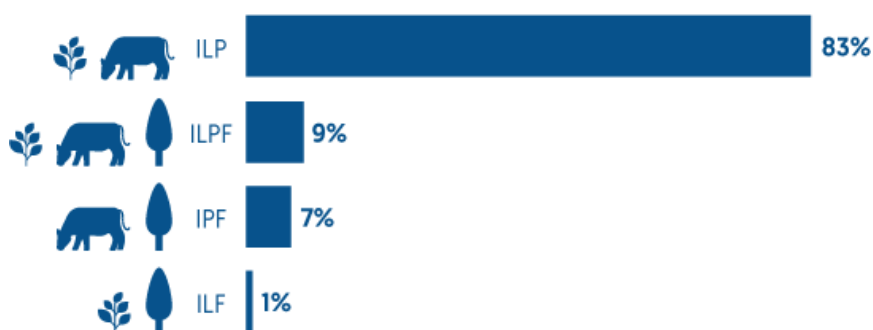
Oliveira *et al.* (2013), em um estudo de caso demonstra a eficiência e viabilidade econômica analisando a evolução dos Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Fazenda Santa Brígida, em Ipameri, Goiás. Os autores ressaltaram que, mesmo sendo uma análise pontual e num cenário controlado com parâmetros medidos e outros estimados, pode-se constituir uma estimativa preliminar dos resultados econômicos do empreendimento da ILPF em análise.

Conforme Barbosa *et al.* (2015), práticas de diversificação e rotação de atividades agrícolas, criação de animais e manejo florestal podem aumentar a produtividade do rebanho, reduzir o tempo de produção, melhorar as condições do solo, controlar pragas e doenças, diminuir riscos econômicos, reduzir custos com recuperação de pastagens degradadas e contribuir para a diminuição dos gases de efeito estufa no Brasil.

De acordo com Silva *et al.* (2019), em estudos sobre a saúde do solo, a implementação de sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no Nordeste brasileiro é uma prática relativamente nova e tem apresentado resultados satisfatórios. Porém, ainda há poucas pesquisas que analisam de que modo essas integrações influenciam a saúde do solo ao longo do tempo, especialmente em regiões semiáridas, considerando médios e longos períodos.

Nesse contexto, segundo estudos da Rede ILPF (2020), os sistemas de ILPF já estavam sendo utilizados em cerca de 11,5 milhões de hectares no Brasil. A pesquisa também revelou que dentro do país, na maioria dessas áreas, aproximadamente das propriedades rurais 83% adotam a configuração ILP. Outros 9% utilizam o sistema ILPF, 7% trabalham com IPF e apenas 1% com ILF (Figura 3).

Figura 7 – Gráfico da utilização dos modelos de sistemas integrados



Fonte: Rede ILPF (2020)

Em concordância com o estudo realizado por Santos (2020), que avaliou o processo de abrangência e informações acerca dos fatores econômicos, sociais e ambientais decorrentes da utilização de sistemas ILPF em propriedades rurais na região central do estado de Minas Gerais.

Outrossim, os sistemas de integração oferecem aumentos significativos na produção, mantendo um impacto ambiental reduzido e contribuindo para a preservação do solo e a sustentabilidade do meio ambiente, como destaca Sousa *et al.* (2022) em sua análise acerca das características e benefícios das diferentes opções em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

Os recursos hídricos também são preservados pelo sistema ILPF. Dados indicam redução de até 60% na erosão do solo e de 40% no escoamento superficial da água das chuvas (Oliveira *et al.*, 2019). Segundo com Torres *et al.* (2022), os sistemas integrados podem elevar em até 30% a taxa de infiltração de água no perfil do solo em comparação com monocultivo (agrícola ou pastagem). Além disso, a presença de árvores e pastagens no sistema ILPF contribui para a agregação do solo, reduzindo a compactação e aumentando a infiltração de água (Balbino *et al.*, 2023).

Indiretamente as propriedades físicas do solo podem afetar o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Andognini *et al.*, 2020; Hargreaves *et al.*, 2019), como a aumentar a resistência do solo à penetração de raízes, ampliar a faixa da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e microporosidade, reduzindo a porosidade total, macroporosidade, capacidade de aeração e condutividade hidráulica saturada do solo (Braga *et al.*, 2024).

Para Souza Neto *et al.* (2024), estudando um sistema de Integração Lavoura- Pecuária-Floresta no Semiárido Brasileiro, os sistemas fundamentados em abordagens agroecológicas visam estabelecer um equilíbrio mais sustentável, com ênfase na diminuição da dependência de insumos externos e na promoção da biodiversidade.

Contudo, de acordo com Maracaípe *et al.* (2025) estudando sobre a sustentabilidade, produtividade e desafios, a implementação da Integração Lavoura- Pecuária-Floresta encontra alguns obstáculos, incluindo elevados custos de investimento inicial, demanda por suporte técnico especializado e complexidades logísticas.

Portanto, entender como o uso do solo afeta sua recuperação, qualidade e funcionamento é fundamental. Assim, é possível otimizar o uso do solo, reduzir riscos e garantir uma produção mais estável, conforme citado por Boeni *et al.* (2025) que destacam que o manejo adequado ajuda a recuperar a qualidade física do solo em Porto Alegre, RS.

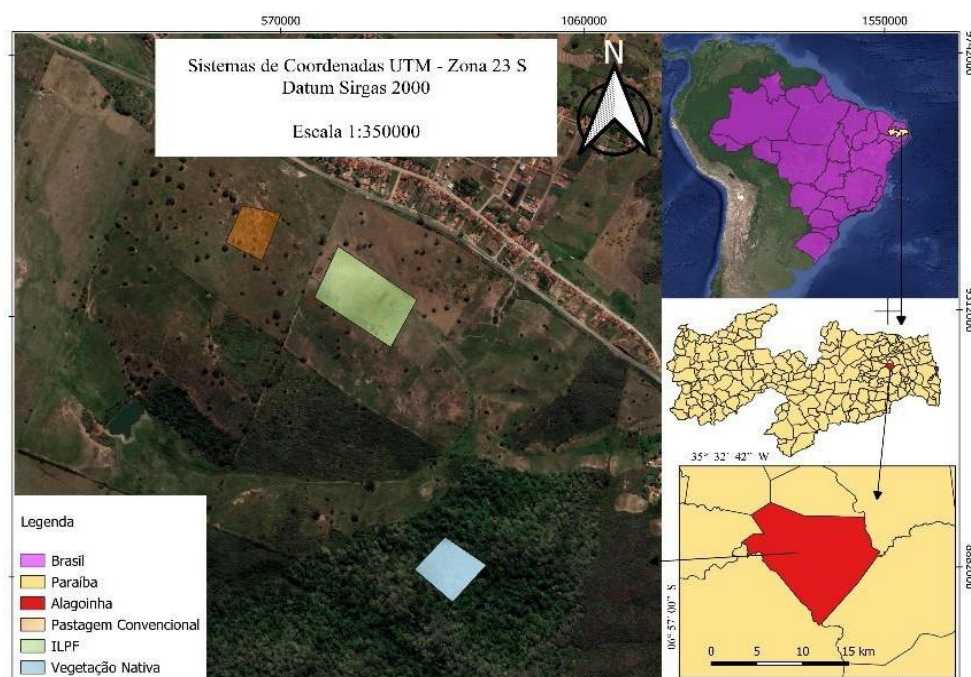
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

A pesquisa foi realizada em duas etapas, sendo a inicial na Estação Experimental da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), localizada em Alagoinha, Paraíba, Brasil ($06^{\circ} 57' 00''$ S e $35^{\circ} 32' 42''$ W), a aproximadamente 317 metros acima do nível do mar (Figura 8).

Segundo a classificação climática Köppen-Geiger, o clima predominante no município é As', caracterizado por ser quente e úmido (Peel *et al.*, 2007), com chuvas de outono-inverno e período de maior precipitação entre abril e julho (Silva e Nascimento, 2020), com média anual é de 995 mm, temperaturas entre 22 e 26°C e a umidade relativa do ar em torno de 65%.

Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo na Unidade Referencial de Transferência de tecnologia URT em Alagoinha no Semiárido Brasileiro



Fonte: Elaboração própria (2025)

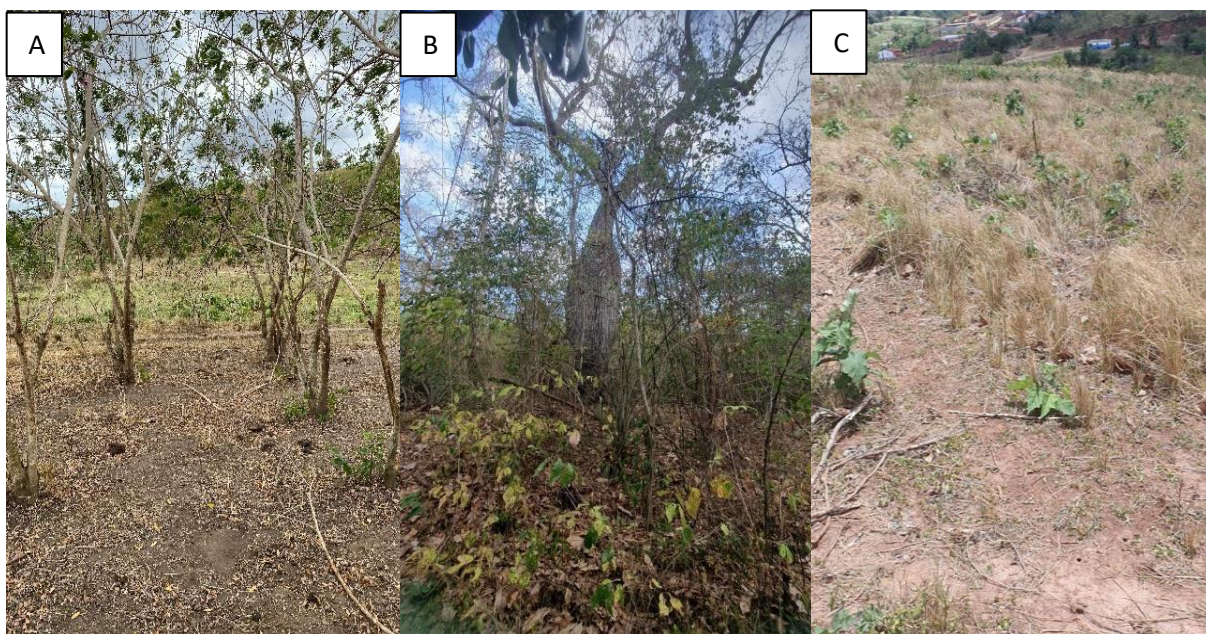
O solo da área experimental foi classificado como Planossolo Háplico Eutrófico mésico com horizonte A moderado e de textura franco-arenosa (Santos *et al.*, 2025).

A segunda etapa foi realizada no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solos e Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba – DSENGR/CCA/UFPB.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC) com seis sistemas de uso do solo: T1) *Brachiaria decumbens* Stapf. (BD); T2) Milho (*Zea mays* L.) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (MI + BD); T3) Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (SB + BD); T4) Gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud) + *Brachiaria decumbens* Stapf. (GL + BD); Vegetação Nativa (T5) e Pastagem Convencional (T6) em três profundidades (0,00-0,10; 0,11-0,20 e 0,21-0,30 m), com quatro repetições (Figura 9).

Figura 9 – Áreas de ILPF (A), Floresta Nativa (B) e Pastagem Convencional (C)



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para efeito de comparação, foram incluídos dois tratamentos adicionais: T5) uma área de vegetação nativa secundária (VN) e T6) uma área de pastagem convencional (PC) em área de manejo intensivo, ambos localizados próximos ao local do experimento.

As espécies florestais utilizadas nos sistemas integrados foram cultivadas em fileiras triplas, com um espaçamento de 3 x 2 metros nas extremidades de cada área designada sob os renques das espécies florestais. O milho consorciado foi plantado em sistema de plantio direto e o componente animal foi inserido na área com sistema de integração logo após o estabelecimento das espécies florestais, ao qual foram utilizados animais (bovinos) da raça Sindi e Guzerá. As parcelas experimentais sob o sistema de integração apresentaram dimensões de 20 x 38 m, totalizando 760m².

A área de vegetação nativa secundária típica de agreste é um fragmento florestal encontrado dentro da área experimental próxima aos sistemas integrados e pastagem convencional, com diferentes espécies e estratos vegetais, dentre algumas espécies encontra-se: Barriguda (*Ceiba glaziovii*), jurema (*Mimosa tenuiflora*), jatobá (*Hymenaea courbari*), aroeira (*Schinus terebinthifolius*).

A área de pastagem convencional, manejada há mais de dez anos com capim braquiária (*Brachiaria decumbens*), caracteriza-se pela entrada de animais, no qual permanecem na área pastejando durante o período das chuvas.

3.3 Coleta e preparo das amostras

As amostras de solo utilizadas para determinar as variáveis foram coletadas de forma a preservá-las na sua estrutura original, garantindo assim a precisão nas análises físicas.

Em cada parcela experimental foram coletadas três amostras deformadas indeformadas em um ponto específico, nas profundidades de 0,00-0,10; 0,11-0,20 e 0,21- 0,30m, totalizando 72 amostras. Foram utilizados anéis volumétricos do tipo Uhland, com capacidade de 98,18 cm³ (Figura 10).

Figura 10 – Amostras indeformadas coletadas em pontos específicos de cada parcela experimental



Fonte: Elaboração própria (2025)

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análises Físicas de Solo, localizado no Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSENGR), do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA-UFPB), onde foram realizadas as análises físicas (Figura 11).

Figura 11 – Laboratório de Análises Físicas de Solo no DSENGR



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.4 Variáveis analisadas

3.4.1 Físicas

As amostras deformadas de solo, após passarem pelo processo de secagem ao ar por 48 horas, foram destorroadas e peneiradas em malha de 2,0 mm de diâmetro, visando à determinação das variáveis de textura, argila dispersa e grau de floculação.

A textura da fração areia foi determinada por peneiramento, a argila foi separada por sedimentação determinada através do método do densímetro de Bouyoucos, utilizando hidróxido de sódio (NaOH 1 molar) como dispersante químico e agitação mecânica como dispersante físico, posteriormente calculou-se o silte por diferença entre as textura de areia e argila (Teixeira *et al.*, 2017).

A determinação do teor de argila dispersa em água (ADA) foi semelhante ao utilizado para determinação da análise textural com ausência do dispersante químico. A partir dos dados de argila total e argila dispersa foi possível calcular o grau de floculação do solo, conforme a Equação 1:

$$GF (g\ kg^{-1}) = (((Arg - ArgH2O)) / Arg) * 1000 \quad (Eq. 1)$$

Onde: GF é o grau de floculação (%); Arg é o teor de argila dispersa em hidróxido de sódio – NaOH (g kg⁻¹); e ArgH2O é o teor da argila dispersa em água (g kg⁻¹).

As variáveis densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA),

microporosidade (MI), condutividade hidráulica ($K\theta$) e resistência à penetração (RP) foram quantificadas coletando-se amostras de solo com estrutura preservada (indeformada), utilizando cilindros metálicos de volume 98,17 cm³.

A densidade do solo (DS) foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Blake e Hartge (1986), pela relação entre a massa do solo seco/volume da amostra de solo no cilindro, correspondente a Equação 2:

$$DS \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = M_{ss} / V \quad (\text{Eq.2})$$

Onde: DS = densidade do solo (g cm⁻³); M_{ss} = massa do solo seco mantido em estufa a ± 105 °C por um intervalo mínimo de 48 horas, ou até atingir massa constante; e V = é o volume da amostra de solo no cilindro calculada através da expressão $(\pi * r^2 * h) - \text{cm}^3$.

A porosidade total (PT) do solo foi determinada por meio da umidade do solo correspondente ao volume de saturação, conforme proposto por Teixeira *et al.* (2017). As amostras de solo indeformadas foram saturadas com água destilada por 48 horas. Preenchendo-se os espaços porosos com diâmetros maiores que 0,05 mm. O objetivo foi determinar o volume de saturação ($\Psi_m = 0$) e porosidade total (Pt). A equação (3) foi utilizada para calcular a porosidade total (Pt) através da diferença da massa saturada e a massa de solo seco pelo volume:

$$PT \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)} = (M_{ssat} - M_{ssec}) / V \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: PT = porosidade total do solo calculada pelo volume de saturação (m³ m⁻³); M_{ssat} = massa do solo saturada (kg⁻¹); M_{ssec} = massa do solo seco em estufa ± 105 °C (kg⁻¹); V = volume da amostra de solo no anel volumétrico calculado pela expressão: $(\pi * r^2 * h)$ em (cm⁻³).

A microporosidade (MI) foi obtida utilizando-se a mesa de tensão com o volume de água no potencial matricial de $\Psi - 6$ kPa em mesa de tensão, por pelo menos 72 horas, ou até que a água deixe de sair dos poros maiores que 0,05 mm. A Macroporosidade (MA) foi obtida através da diferença entre a microporosidade do solo e a porosidade total em mesa de tensão com as Equações 4 e 5:

$$MI = (M_{s6kPa} - M_{ss}) / V \quad (\text{Eq. 4})$$

$$MA = MI - PT \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde: MI = é a microporosidade ($m^3 m^{-3}$); M_{ss} = (massa do solo seco a $105^\circ C$), P_t = (porosidade total); MA = macroporosidade ($m^3 m^{-3}$); $M_{s 6 kPa}$ = massa do solo submetido ao potencial matricial de $\Psi - 6 kPa$ na mesa de tensão ($m^3 m^{-3}$) e V = volume do cilindro (cm^3).

A condutividade hidráulica saturada ($K\theta$) foi determinada por meio do permeâmetro de carga constante, conforme descrito em (Teixeira *et al.*, 2017), com a Equação 6:

$$K\theta = Q \times L / A \times H \times t \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde: K = é condutividade hidráulica saturada ($cm h^{-1}$); Q = volume do percolado (mL^{-1}); L = altura do bloco de solo (cm); A = área do cilindro (cm^2); H = altura do bloco de solo + coluna de água (cm); t = tempo em horas da coleta do volume percolado.

A determinação da resistência à penetração (R_p) foi realizada através do penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA-933 (Marconi®), equipado com variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30° , receptor e interface acoplado a um microcomputador para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento (Klein *et al.*, 2009).

As determinações foram realizadas em amostras com estrutura preservada sob tensão de água no solo próximo à capacidade de campo retiradas da mesa de tensão (Dalchiavon *et al.*, 2011).

3.4.2 Análise estatística

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. Os resultados foram submetidos à análise de variância com modelos lineares mistos utilizando-se o pacote (lmerTest), as médias comparadas pelo teste de Tukey, ambos a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas usando o softer R® (R Core Team, 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1, observar-se os valores médios da análise de textura (areia, silte e argila) e grau de floculação (GF) em diferentes profundidades do solo (0,00-0,10; 0,11- 0,20; e 0,21-0,30 m). Conforme observado, nas profundidades de amostragem e tratamentos, é possível constatar uma textura entre Franco arenoso e Franco argilo- arenoso em que os teores de areia variam de $703 g kg^{-1}$ na camada de 0,00-0,10 m a $383 g kg^{-1}$ na camada de 0,21-0,30 m.

Tabela 1 – Análise de textura, grau de floculação e classificação textural em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura–Pecuária–Floresta, Vegetação Nativa e Pastagem Convencional no Agreste da Paraíba

TRATAMENTOS	Granulometria			Grau de Floculação	Classificação Textural
	Areia	Silte	Argila		
	g.kg ⁻¹				
	0,00 - 0,10 m				
BD	681	152	167	819	Franco arenoso
MI+BD	683	155	162	884	Franco arenoso
SB+BD	686	152	162	919	Franco arenoso
GL+BD	703	139	158	904	Franco arenoso
VN	435	259	306	830	Franco argiloso
PC	501	205	294	903	Franco argilo-arenoso
	0,11 - 0,20 m				
BD	650	160	190	861	Franco arenoso
MI+BD	695	136	169	862	Franco arenoso
SB+BD	692	142	166	842	Franco arenoso
GL+BD	696	144	160	816	Franco arenoso
VN	437	274	289	809	Franco argiloso
PC	467	216	317	900	Franco argiloso
	0,21 - 0,30 m				
BD	672	131	197	738	Franco arenoso
MI+BD	638	142	220	712	Franco argilo-arenoso
SB+BD	698	128	174	780	Franco argilo-arenoso
GL+BD	709	119	172	871	Franco arenoso
VN	383	284	333	763	Franco argiloso
PC	449	223	328	854	Franco argiloso

BD: *Brachiaria decumbens*; MI+BD: Milho (*Zea mays* L.) + *Brachiaria decumbens*; SB+BD: Sabiá (*Mimosa caesalpinhiifolia*) + *Brachiaria decumbens*; GL+BD: Gliricídia (*Gliricidia sepium*) + *Brachiaria decumbens*; VN: Vegetação Nativa; PC: Pastagem Convencional.

Fonte: Elaboração (2025)

A análise de textura revelou quantidades elevadas da fração areia em todos os tratamentos por camadas com médias de 614 g kg⁻¹ na camada de 0,00-0,10 m, 606 g kg⁻¹ na camada de 0,11-0,20 m e 592 g kg⁻¹ na camada de 0,21-0,30 m. Todavia, observa-se um aumento progressivo nos teores de argila em profundidade em todos os tratamentos, apresentando médias de 208 g kg⁻¹ na camada superficial (0,00-0,10 m), 215 g kg⁻¹ na camada intermediária (0,11-0,20 m) e 237 g kg⁻¹ na camada mais profunda (0,21-0,30 m).

Esses resultados caracterizam a classe dos Planossolos Háplicos, que apresentam incremento de argila em profundidade devido ao processo de desargilização. Santos e Zaroni (2018) ressaltam em seus trabalhos uma redução similar de argila na camada superficial acompanhada de acúmulo ou concentração significativa no horizonte subsuperficial.

Devido ao solo da área experimental ser caracterizado como Planossolo Háplico, cuja

camada superficial apresenta textura predominantemente arenosa ou argilosa, associada a estrutura fraca (Pompeu *et al.*, 2025). Ademais, observa-se transições abruptas entre os horizontes A e B do solo, as quais contribuem para o incremento da fração argila com o aumento da profundidade (Santana *et al.*, 2025).

O maior valor de grau de floculação encontrado foi no sistema SB+BD de 919 g kg⁻¹ na camada 0,00-0,10 m e o menor valor no sistema MI+BD de 712 g kg⁻¹ na camada de 0,21-0,30 m, uma variação de 207 g kg⁻¹ visto que todos os valores de GF dos sistemas de usos do solo se aproximaram de 1000 g kg⁻¹ ou 100%, no qual pode-se observar uma tendência.

Em virtude disso, pode-se notar que o solo analisado da área experimental apresenta uma baixa capacidade de desagregação, uma vez que todos os valores de GF dos tratamentos tenderam próximo a 1000 g kg⁻¹.

Resultados semelhantes foram encontrados por Barreto (2019), que ao investigar o comportamento do GF em Latossolos, observou valores de grau de floculação próximos a 1000 g kg⁻¹ ou 100%, indicando assim baixa predisposição à desagregação de microagregados.

A determinação do grau de floculação é muito importante, pois indica a capacidade de desagregação dos microagregados do solo. Isso se justifica porque, quanto maior o valor do GF, menor a tendência do solo em se desagregar (Nóbrega, 2020).

Não houve diferença estatística significativa ao nível de ($p < 0,05$) entre os diferentes sistemas de uso do solo para as médias da vegetação nativa em relação aos sistemas analisados, sendo explicado pelas letras maiúsculas, podendo-se atribuir esse fenômeno a ação antrópica nos sistemas estudados.

Essa ocorrência pode ser justificada pela complexidade do sistema integrado provavelmente está em equilíbrio devido a ampla interação entre os componentes, minimizando os impactos adversos que causariam alterações significativas, como ressalta Campos *et al.* (2024), estudando sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na região Amazônica.

Contudo, o período de avaliação prolongado é essencial para identificar variações mais significativas, como proposto por Lobato *et al.* (2018), que estudou os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico do Cerrado brasileiro sob diferentes sistemas de manejo após 8 anos de implementação.

Para o atributo densidade do solo (Ds), não foi observada diferença estatisticamente significativa (Tabela 2) entre os diferentes sistemas de uso do solo por camadas, como proposto por Reichert *et al.* (2003), que preconiza valores considerados críticos de densidade do solo

Tabela 2 - Densidade (DS), Porosidade total (PT), Microporosidade (MI), Macroporosidade (MA), Condutividade hidráulica (K θ) e Resistência à Penetração (RP) em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura–Pecuária–Floresta, Floresta nativa e Pastagem degradada no Agreste da Paraíba

TRAT	DS			PT			MA		
	-----g cm ⁻³ -----			-----m ³ .m ⁻³ -----					
	0,00-0,10m	0,11-0,20m	0,21-0,30m	0,00-0,10m	0,11-0,20m	0,21-0,30m	0,00-0,10m	0,11-0,20m	0,21-0,30m
BD	1,43aA	1,48aA	1,47aA	0,35bA	0,35bA	0,35bA	0,13aA	0,09aA	0,07aA
MI+BD	1,39aA	1,44aA	1,44aA	0,32bA	0,32bA	0,32bA	0,12aA	0,10aA	0,06aA
SB+BD	1,32aA	1,37aA	1,36aA	0,33bA	0,33bA	0,32bA	0,13aA	0,10aA	0,08aA
GL+BD	1,38aA	1,42aA	1,42aA	0,32bA	0,32bA	0,32bA	0,13aA	0,10aA	0,07aA
VN	1,37aA	1,41aA	1,41aA	0,43aA	0,43aA	0,43aA	0,13aA	0,10aA	0,08aA
PC	1,39aA	1,43aA	1,43aA	0,35bA	0,35bA	0,35bA	0,11aA	0,08aA	0,06aA

TRAT	MI			K θ			RP		
	-----m ³ .m ⁻³ -----			-----cm h ⁻¹ -----			-----MPa-----		
	0,00-0,10m	0,11-0,20m	0,21-0,30m	0,00-0,10m	0,11-0,20m	0,21-0,30m	0,00-0,10m	0,11-0,20m	0,21-0,30m
BD	0,21bA	0,24bA	0,27bA	4,42aA	2,68aA	3,67aA	1,82aA	1,62aA	1,27aA
MI+BD	0,21bA	0,23bA	0,25bA	7,18aA	5,43aA	6,42aA	1,54aA	1,35aA	0,99aA
SB+BD	0,19bA	0,22bA	0,24bA	7,39aA	5,65aA	6,64aA	1,20aA	1,00aA	0,65aA
GL+BD	0,18bA	0,22bA	0,24bA	5,85aA	4,11aA	5,10aA	1,22aA	1,02aA	0,67aA
VN	0,30aA	0,33aA	0,35aA	3,92aA	2,17aA	3,16aA	1,27aA	1,07aA	0,74aA
PC	0,23abA	0,26abA	0,29abA	4,63aA	2,89aA	3,88aA	1,86aA	1,66aA	1,31aA

BD: *Brachiaria decumbens*; MI+BD: Milho (*Zea mays L.*) + *Brachiaria decumbens*; SB+BD: Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) + *Brachiaria decumbens*; GL+BD: Gliricídia (*Gliricidia sepium*) + *Brachiaria decumbens*; VN: Vegetação Nativa; PC: Pastagem Convencional.

Fonte: Elaboração própria (2025)

diferentes para cada classe textural: entre 1,30 e 1,40 g m⁻³ para solos argilosos, de 1,40 a 1,50 g m⁻³ para solos franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 g m⁻³ para solos franco-arenosos, não sendo observado esses comportamentos.

Segundo Reichardt e Timm (2012), os macroporos são responsáveis pelo livre movimento da água e aeração do solo. Nesse contexto, de acordo como Reinert (2006), sugere que valores de macroporos menores que 0,10 m³ m⁻³ ou (10%) apresentam uma dificuldade na circulação de ar para as raízes das plantas, o que pode causar estresse na planta e limitar o seu desenvolvimento.

Não foi observada variação estatisticamente significativa ao nível ($p < 0,05$) na macroporosidade entre os diferentes tratamentos para as três camadas analisadas. Esse resultado pode ser atribuído à influência da fração areia encontrada na área experimental nesta pesquisa, onde partículas maiores criam espaços vazios maiores. Isso reorganiza a estrutura do solo, altera a distribuição dos tamanhos de poros e reduz a quantidade de poros maiores, apresentando comportamento limitante para o crescimento das raízes.

Os dados apresentados são semelhantes aos obtidos por Assis *et al.* (2019), que relatam comportamento análogo estudando os atributos físicos, químicos e biológicos do solo no sistema de iLPF no estado do Mato Grosso, evidenciando variações para a Ma oscilando entre 0,06 e 0,17 m³ m⁻³. Confirmando essa constatação, resultados semelhantes aos desta pesquisa foram encontrados por Silva *et al.* (2019), avaliando a qualidade física do solo sob iLPF na mesma área de estudo.

Para os tratamentos MI+BD, SB+BD, GL+BD e VN observa-se que a variável Ma permaneceu igual ou superior ao limite crítico para as camadas de 0,00-0,10 e 0,11- 0,20 m, como ressalta Reichert *et al.* (2007), que preconiza valores médios de 0,10 m³ m⁻³, propiciando a manutenção da estrutura física nas superficiais do solo avaliado.

A condutividade hidráulica saturada não apresentou diferença estatística significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos para as três camadas avaliadas, contudo, revelou-se lenta a moderada para BD, GL+BD, VN e PC com valores médios oscilando de 5,85 a 2,17 cm h⁻¹, conforme determinado por Soil Survey Staff (1993): $K\theta > 25,4$ cm h⁻¹; = muito rápida; $25,4 \geq K\theta > 12,7$ = moderada a rápida; $12,7 \geq K\theta > 6,35$ = moderada; $6,35 \geq K\theta > 2,0$ = lenta a moderada; $2,0 \geq K\theta > 0,5$ = lenta; $K\theta < 0,5$ = muito lenta, evidenciando a incapacidade hidromórfica dos Planossolos em regiões semiáridas, como verificado nesta pesquisa.

De acordo com Oliveira *et al.* (2018), essa condição pode estar associada à composição mineralógica desses solos ou à sua drenagem imperfeita, característica da classe dos Planossolos. Confirmando essa observação, Nascimento *et al.* (2018) destacam que variáveis

como tamanho, disposição e formato dos poros desempenham papel fundamental na compreensão da influência dos componentes vegetais na estrutura do solo nos sistemas integrados.

Para os tratamentos SB+BD e MI+BD a pouca variação dos valores médios de 7,39 a 6,42 cm h⁻¹ nas três camadas avaliadas foram considerados moderados em termos de velocidade, sendo apontados como bom em movimento de água no perfil, como proposto na classificação de Vomocil e Flocker (1961), evidenciado em estudos relacionados aos efeitos da movimentação de ar e água no solo.

Alvarenga *et al.*, (2010), afirmam que a infiltração de água no perfil do solo é em razão da utilização dos sistemas de ILPF, promovendo melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo.

Os dados indicam que não houve diferença estatística significativa ($p < 0,05$) na resistência à penetração entre os tratamentos nas três camadas analisadas, com valores médios variando de moderada, entre 1,86 e 1,20 MPa na camada de 0,00-0,10 m; a baixa com 0,99; 0,74; 0,67 e 0,65 MPa na camada de 0,21-0,30 m, respectivamente, conforme mencionado por Arshad *et al.* (1996) sendo: a) extremamente baixa: $R_p < 0,01$ MPa; b) muito baixa: $0,01 R_p < 0,1$ MPa; c) baixa: $0,1 R_p < 1,0$ MPa; d) moderada: $1,0 R_p < 2,0$ MPa; e) alta: $2,0 R_p < 4,0$ MPa; f) muito alta: $4,0 R_p < 8,0$ MPa e g) extremamente alta: $R_p > 8,0$ MPa

Para os atributos Porosidade Total (PT) e Microporosidade (MI), conforme apresentado (Tabela 2), verificou-se diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre tratamentos para as variáveis estudadas.

A porosidade total apresentou diferença significativa ao nível de ($p < 0,05$) para o tratamento VN, apresentando os maiores valores médios entre os tratamentos sendo 0,43 m³ m⁻³ para as três camadas, considerado um sistema poroso aceitável e frequentemente observados em áreas cobertas por vegetação nativa, como relata Luciano *et al.* (2010) em literatura.

A justificativa pode estar na fração areia da camada superficial dos Planossolos e o alto teor de matéria orgânica do solo, proveniente da decomposição da parte aérea e radicular de árvores e arbustos, concomitantemente a atividade biológica, ajuda a criar canais entre os bioporos melhorando a porosidade e aumentando a retenção de água, beneficiando as condições físicas do solo, como nota-se (Tabela 2).

Contudo, os tratamentos referentes aos sistemas integrados e PC não diferiram estatisticamente da VN apresentando valores médios variando entre 0,32 a 0,35 m³ m⁻³, sinalizando que o superpastejo animal nas áreas pode causar compressão superficial e alterar a densidade do solo, reduzindo o número de macroporos, evidenciando a perda de qualidade física

do solo nas áreas cultivadas e constatando que os sistemas de manejo adotados por determinado tempo afetam a PT.

Resultados semelhantes foram observados por Rossetti e Centurion (2013) e Ferreira *et al.* (2025) estudando a relação entre sistemas de manejo e atributos físico- hídricos do solo. De acordo com Kiehl (1979), valores semelhantes apresentam relevância, uma vez que para que um solo seja classificado como adequado ao uso agrícola, sua porosidade total deve situar-se próxima de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, evidenciando a influência da densidade do solo sobre a porosidade total neste estudo.

A redução da PT pode ser constatada comparando com trabalhos de Silva (2019), Nóbrega (2020) e Sabino (2023) em estudos sobre os atributos físico-hídricos na mesma área experimental, na qual houve uma diferença média entre os trabalhos dos autores e este de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para BD; $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para GL+BD; e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para MI+BD e SB+BD. Esses resultados demonstram que o volume total e a distribuição de poros foram alterados pela implementação dos sistemas integrados de manejo na área ao longo dos anos.

A microporosidade apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) para o tratamento VN, apresentando os maiores valores médios para as três camadas avaliadas de $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, podendo ser justificada pela influência da textura argilosa com maior concentração dos microporos em relação aos macroporos. Resultados semelhantes foram encontrados Ferreira *et al.* (2025) estudando as propriedades físico-hídricas na mesma área experimental.

Conforme estudos de Vendruscolo *et al.* (2011), citado por Ferreira *et al.* (2025), em solos de textura argilosa sob vegetação nativa, a proporção de microporos aumenta com a profundidade, tornando-se maior do que a de macroporos. Contudo, comparando com os sistemas integrados, que apresentaram valores médios variando de $0,21$ a $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o comportamento pode ser justificado pela maior quantidade da fração arenosa encontrada nessas áreas, reduzindo a porosidade do solo e, conseqüentemente, afetando sua estrutura física, causando redução no armazenamento de água disponível para as plantas.

Corroborando com estudos de Teles (2019), a compactação do solo pode variar em diferentes níveis, dependendo do tipo de solo. Confirmando essa constatação, Braga *et al.* (2024) ressalta que a densidade elevada costuma prejudicar as características das camadas de solo e das plantas, pois diminui os espaços maiores entre as partículas (macroporosidade) e aumenta os espaços menores (microporosidade).

5 CONCLUSÃO

Houve predominância da textura arenosa nas profundidades de solo sob todos os diferentes sistemas de uso do solo.

Os sistemas integrados de produção agropecuária SB+BD e GL+BD demonstraram potencial de melhoria no solo, diminuindo a densidade e resistência à penetração e, concomitantemente, melhorando a porosidade, aeração e infiltração de água no solo, assemelhando-se o mais próximo a condição natural.

O sistema BD mostrou que, ao longo do período de 10 anos, não promoveu alterações significativas nas propriedades físicas do solo mesmo com o superpastejo do animais, assemelhando-se a PC e aos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

REFERÊNCIAS

- ADÃO, F., PÁDUA, L., & SOUSA, J. J. (2025). Evaluating soil degradation in agricultural soil with ground-penetrating radar: a systematic review of applications and challenges. **Agriculture**, 15(8), 852.
- ALMEIDA, L. S. de.; FERREIRA, V. A. S.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1539-1547, set. 2016. DOI 10.1590/s0100-204x2016000900053. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2016000901539&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 04 jun. 2025.
- ALMEIDA, R. G. et al. Sistemas integrados de produção agropecuária e seus impactos na sustentabilidade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 47, 2018.
- ALVARENGA, R. C.; SILVA, V. P. da; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, M. C. M.; VILELA, L. Sistema integração lavoura-pecuária-floresta: condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 257, p. 59-67, jul/ago. 2010.
- ALVES, R. E.; SOUZA, L. F.; QUEIROZ, T. A. F.; LIMA, J. V. A degradação e fragilidade dos solos do sudeste de Goiás: o caso da bacia hidrográfica do Ribeirão da Picada. **Revista Geográfica da América Central**, Heredia, v. 56, n. 1, p. 235-258, 2016.
- ALVES, H. K. M. N.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no semiárido brasileiro. **Rev. Bras. Geogr. Fís.** Recife, v. 15, n. 1, p. 373-392, maio/jun. 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p373-392>
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. IN: DORAN, J. W.; JONES, A. J. Methods for assessing soil quality. Madison: **Soil Science Society of America**. p.123-141, 1996. 2 SSSA Special publication, 49.
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; SILVEIRA, A. L. R.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E. Biological soil properties in integrated crop-livestock-forest systems. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. Viçosa, v. 41, e0160209, jan./dez. 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160209>
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Agrarian**, Dourados, v. 12, n. 43, p. 57-70, 2019.
- BALBINO, L. C.; MARTINEZ, G. B.; GALERANI, P. R. Ações de transferência de tecnologia de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. Planaltina: Embrapa Cerrados;

Belém: **Embrapa Amazônia Oriental**, 2011. 52p.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (ed.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília: Embrapa, 2011. 130 p.

BALBINO, L. C. et al. Benefícios do ILPF para a qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0230015, 2023.

BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, 62:301-309, 2015.

BARBOSA, F. A.; COSTA, P. M.; ANDRADE, V. J.; MAIA FILHO, G. H. B.; MACIEL, I. C. F.; LOPES, S. Q. Avaliação econômica e produtiva dos sistemas integrados de lavoura pecuária-floresta. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 151-165, 2015.

BARRETO, A. B.; TAVARES, D. D.; SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; MARTINS, A. F.; PEREIRA, W. E. Argila dispersa em água e grau de floculação de um Latossolo sob gramíneas no Brejo da Paraíba (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 3, p. 10-19, 2019.

BEHLING, M.; WRUCK, F. J.; ALVES ANTONIO, D. B. A.; MENEGUCI, J. L. P.; PEDREIRO, B. C.; CORNEVALLI, R. A.; CORDEIRO, L. A. M.; GIL, J.; NETO, A. L. DE F.; DOMIT, L. A.; SILVA, J. F. V. **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)**. Boletim de Pesquisa de Soja, 1, 306-325. 2014.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, Á. P. D.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36, 971-982. 2012.

BOENI, M.; DA COSTA, L. C.; SCHÚ, A. L.; PADILHA, L. R.; DEUSCHLE, D.; BARATTO, T.; LAGO, V. B. Sistemas de manejo e seu potencial em recuperar a qualidade física do solo. Porto Alegre: SEAPI/DDPA, 2025. 35 p. (**Boletim técnico: pesquisa e desenvolvimento**, 15).

BONGIORNO, G.; BÜNEMANN, E. K.; OGUEJIOFOR, C. U.; MEIER, J.; GORT, G.; COMANS, R. N. J.; MÄDER, P.; BRUSSAARD, L.; GOEDE, R. D. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, [online], v. 99, p. 38-50, apr. 2019.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 647p.

BRA DY, N. C.; WEIL, R. R. Matéria orgânica do solo. In: BRADY, Nyle, C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 11, p. 398-436. ISBN 978-85-65837-74-3.

BRAGA, S. E., ROLIM NETO, F. C., ALMEIDA, B. G. DE, ALMEIDA, C. D. G. C. DE, SILVA, V. DE P., WANDERLEY, R. A., & RIZZI NETO, E. (2024). Resistencia do solo à penetração de raízes no solo: uma revisão da literatura. **Caderno Pedagógico**, 21(4), e3750. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-087>

BUNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MADER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

CAMPOS, M. F.; de LIMA SENA, W.; da SILVA, A. L. P.; MEDEIROS, J. G. S.; de MELO SALES, T.; MEIRELES, V. M., ... & dos SANTOS VIANA, J. Estado da arte do sistema integração lavoura pecuária floresta na Região Amazônica. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, p. e11874-e11874, 2024.

CARMO, M. C.; CUNICO, J. M.; SANTOS, M. R. G.; SILVA, P. K. M.; SIQUEIRA, M. G. Densidade e porosidade do solo em pastagem recuperada e degradada na Amazônia Ocidental. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, 2018.

CARTER, M. R. Quality: Critical Limits and Standardization. In: LAL, R. (Org.). **Encyclopedia of soil science**. 2. ed. Ohio, USA: Taylor e Francis Group, p. 1– 1924, 2006.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, L. D.; FRANCO, A. L.C; CERRI, C. E. P; TORMENTA, C. A. TORMENA; CERRI C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 215–226, 2016.

CONCEIÇÃO, M. C.; MATOS, E. D. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R.; CORDEIRO, R. C. Changes in soil carbon stocks under Integrated Crop-Livestock- Forest system in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, 8:904-913, 2017.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

COSTA J. R. C.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; BERNOUX. M. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 1-12, 2012.

COSTA FILHO, João da. Degradação do solo nos estabelecimentos rurais do Nordeste Brasileiro. 156f. **Tese (Doutorado em Economia Rural)** - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2025.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Integração lavourapecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, 2015.

CORTEZ, J. W.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; ARCOVERDE, S. N. S.; OLSZEVSIN, N. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 11, n. 42, p. 343- 351, 2018.

DALCHIAVON, F. C.; PASSOS E. CARVALHO, M.; NOGUEIRA, D.; ROMANO, D.; LIMA A. F.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M.S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.41, n.1, p.8-19. 2011.

DANTAS, J. D. A. N., OLIVEIRA, T. S., MENDONÇA, E. S., & ASSIS, C. P. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodí, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 18-26, 2012.

DE OLIVEIRA SILVA, M., VELOSO, C. L., DO NASCIMENTO, D. L., DE OLIVEIRA, J., DE FREITAS PEREIRA, D., & DA SILVA COSTA, K. D. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

DE SENE, S. M. Análise dos sistemas de integrações lavoura, pecuária e/ou floresta no Brasil. 2021. **Tese de Doutorado**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

DE SOUSA NETO, A. T.; DE OLIVEIRA, F. P.; DA SILVA, P. L. F.; CAMPOS, M. C. C., & FRANCISCO, P. R. M. Atributos físicos de um planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária no semiárido Paraibano. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 3, p. e12197-e12197, 2024.

DE SOUZA, E. D.; DA SILVA, C. R. M.; PINTO, F. A.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; PACHECO, L. P., ... & DOS SANTOS LAROCA, J. V. Indicadores de qualidade do solo após a conversão de campos de murundus em plantio direto no Cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. e00374-e00374, 2019.

DEXTER, A. R.; YOUNGS, I. M. Soil physic toward 2000. **Soil Tillage Research**, v. 24, p. 101-106, 1992.

DIAS-FILHO, M. B. Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação. 3.ed. Belém: **Embrapa Amazônia Oriental**, 2007. 190 p.

DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P.; CAMPOS, N. C. C.; MONTOVANELLI, M. B. C.; MOTA JÚNIOR, R. C. Avaliação da variabilidade espacial da resistência a penetração e teor de água de um solo de terra preta arqueológica. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 4, n. 3, p. 200-208, 2019.

EMBRAPA. **Pecuária em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP)**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/5066002/pecuaria-em-sistema-de-integracao-lavoura-pecuaria-ilp>

EMBRAPA. **Integração lavoura-floresta** (ILF). 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/5071001/integracao-lavoura-floresta>

EMBRAPA. **IPF Fazenda São Paulo**. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/7089004/ipf-fazenda-sao-paulo>

EMBRAPA (Brasil). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/nota-tecnica>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FACCIN, F. C.; MARCHETTI, M. E.; SERRA, A. P.; & ENSINAS, S. C. Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio com milho safrinha e capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, p. 2000-2009, 2016.

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **Solos saudáveis para as pessoas e para o planeta**: FAO pede reversão da degradação do solo. 2022.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. ONU News: **Perspectiva Global Reportagens Humanas**. Dez, 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/12/1824382>

FERREIRA, C. R. Indicadores da qualidade do solo em uma cronossequência sob sistema plantio direto em Guaíra - PR. 2016. 91 f. **Tese** (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/2457>

FERREIRA, V. S.; OLIVEIRA, F. P. de; SILVA, P. L. F. de; MARTINS, A. F.; PEREIRA, W. E.; SANTOS, D; SOUZA, T. A. F. de; SANTOS, R. V. dos; CAMPOS, M. C. C. Propriedades físico-hídricas de um Planossolo sob sistema integrado de cultivo-pecuária-floresta de longo prazo no semiárido brasileiro. **Forests**. 2025, 16(8), 1261. <https://doi.org/10.3390/f16081261>

FIGUEIREDO, C. C. et al. Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 618, p. 1572–1582, 2018.

GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água no solo sob diferentes sistemas de manejo. **Irriga**, v.17, p.337-345, 2012.

GONTIJO NETO, M. M. et al. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta em Minas Gerais. EMBRAPA, Sistemas Agroflorestais e Desenvolvimento Sustentável, **2013**

GOIANO, AAOPPGCI. Percepção de produtores de leite diante do plano para uma agricultura de baixa emissão de carbono. 2020. **Tese (Doutorado)** – Instituto Federal de Educação.

GUEDES, H.M. et al. Caracterização da distribuição do tamanho de agregados de diferentes sistemas de manejo e seu conteúdo de carbono em Latossolo vermelho escuro na região dos Cerrados, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília. **Anais...** Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p.329-333.

KERBER, T. L.; KLEIN, V. A.; KLEIN, C.; GRAEBIN, G. J.; RECK, R.; MACIOSK, D. Porosidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho distroférrico típico sob plantio direto. **XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Florianópolis, SC. (Apresentação de Trabalho/Congresso), 2013.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1979. 262 p.

KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ZIMMER, A. H.; SOARES, C. O.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e o progresso do setor agropecuário brasileiro. In: BUNGENSTAB, Davi José (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012. cap. 1, p. 1-9. ISBN 978-85-7035-110-4.

KLEIN, V. A., BASEGGIO, M., & MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 39, p. 2475-2481, 2009.

KLUTHCOUSKI, J. et al. **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. Embrapa, 2020.
LOBATO, M. G.; SAMPAIO, F.; NÓBREGA, J. C.; FERREIRA, M.; MATIAS, S. S.; TORRES, A.; SILVA, C.; CUNHA, C. S. Physical attributes of a Oxisol from the Brazilian Cerrado under diferente management systems. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 1, p. 361-368, 2018.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. DOS. Densidade e fertilidade do solo sob sistemas de plantio direto e de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Revista Ciências Agrárias**, v.55, p.260-268, 2012.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 5, p. 1347- 1357, 2014.

LUCIANO R. V.; BERTOL I.; BARBOSA F. T.; KURTZ C.; FAYD J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto em comparação com a mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agrovetetárias**. 9(1): 9-19, 2010.

MACEDO, M. C. M. Degradação de Pastagens: Conceitos e Métodos de Recuperação. In: **Anais do Simpósio Sustentabilidade da Pecuária de Leite no Brasil**. Editado por Vilela, Duarte; Martins, Carlos Eugênio; Bressan, Matheus e Carvalho, Limírio de Almeida. Embrapa Gado de Leite. p.137-150. 1999.

MACEDO, M. C. M.; DE ARAÚJO, A. R. Sistemas de produção em integração: alternativa para recuperação de pastagens degradadas. **Embrapa Gado de Corte- Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2019.

MACEDO, M. C. M. et al. Braquiárias e Panicuns em Sistemas Integrados: Adaptação, Manejo e Contribuição para a Sustentabilidade. Brasília: **Embrapa**, 2020. 156 p.

MARACAÍPE, I. D. S. M.; RODRIGUES, M. M.; PAIVA, L. F. C. D.; ALVES, C. R. C. R.; CASTRO, E. C.; FERREIRA, E. M., & COSTA, L. C. Sistema de Integração lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF): Sustentabilidade, Produtividade e Desafios. In: **Agropecuária e meio ambiente: uma visão integrada**. Editora Científica Digital, 2025. p. 296-309. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/250319061.pdf>

MARTINS, C. F.; FONSECA-NETO, A. M.; BESSLER, H. C.; DODE, M. A. N.; LEME, L. O.; FRANCO, M. M.; MCMANUS, C. M.; MALAQUIAS, J. V.; FERREIRA, I. C. Natural shade from integrated crop–livestock–forestry mitigates environmental heat and increases the quantity and quality of oocytes and embryos produced in vitro by Gyr dairy cows. **Livestock Science**, v.244, 104341, 2021.

MATOS, W. M. N.; BASSACO, M. V. M. Análise da compactação do solo sob diferentes usos e manejos. **Observatório de la economía latinoamericana**, v. 21, n. 7, p. 7552-7571, 2023.

NASCIMENTO, C. D.; COSTA, M. C.; TOMA, R.; MOTA, J. C.; MENEZES, A.; COOPER, M. Soil structure and porous system in response to plant components of no agrosilvopastoral system. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 5, p. 63-78, 2018.

NÓBREGA, C. C. da. Atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta para agricultura familiar no Semiárido Brasileiro. 162 f. **Tese de Doutorado** (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo). UFPB, Centro de Ciências Agrárias, Areia – PB, agosto de 2020.

OLIVEIRA, P. D.; FREITAS, R. J.; KLUTHCOUSKI, J.; RIBEIRO, A. A.; CORDEIRO, L. A. M.; TEIXEIRA, L. P. & BALBINO, L. C. Evolução de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): **estudo de caso da Fazenda Santa Brígida, Ipameri, GO**. (2013).

OLIVEIRA, L. F.; JÚNIOR, A. P.; NACHTIGAL, S. D.; PINTO, L. F. S.; CADONÁ, E. A.; MIGUEL, P. Variação das características pedológicas de Planossolos da região sul do estado do Rio Grande do Sul. In: **4ª Semana Integrada**, UFPEL. 2018.

PALADINI, F. L. dos S.; MIELNICZUK, J. Distribuição do tamanho dos agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.1, p.135-140, jan./abr. 1991.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B.L. & MCMAHON, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**. 11(4): 1633-1644.

POMPEU, R.; DE SOUZA VALLADARES, G.; DE SOUZA, H. A.; VOLTOLINI, T. V.; FEITOSA, T. S.; DE NOVAIS, A. C.; & CHAGAS, G. R. Caracterização e classificação dos solos da Unidade de Referência Tecnológica no Sertão Central do Ceará do projeto Forrageiras para o Semiárido. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Sobral, CE / março, 2025.

PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; PARRON, L. M.; TURETTA, A. P. D.; & DE CARVALHO BALIEIRO, F. Oportunidades e desafios relacionados aos serviços ecossistêmicos de solo e água na paisagem rural. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 2, p. e26955-e26955, 2022.

PULROLNIK, K.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; SOUZA, K. W.; MORAES NETO, S. P. Recomendações para inserção do componente arbóreo em sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta. **Embrapa**, Planaltina, p. 1- 12, 2019.

RANGEL, J. D. A., MUNIZ, E. N., DE MORAES, S. A., DE SOUZA, S. F., DO AMARAL, A. J., & PIMENTEL, J. C. M. **Integração lavoura pecuária floresta na região Nordeste do Brasil**. 2016.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29- 48, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M. & SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação Do Solo e da Água. 16., 2006. Anais. Aracajú, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2006. CD-ROM.

REICHERT, J. M., SUZUKI, L. E. A. S., & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do Solo. 2008. In: LIER, Q. J. V (Ed.) **Física do Solo**. Ed. 1. Viçosa: SBCS, 2010, cap. 2, p. 29-102, 2008.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. J.; HORN, R., & HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 1– 13, 2009.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Densidade de referência e grau crítico de compactação para produção de culturas em plantio direto em solos subtropicais altamente intemperizados. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009. DOI: 10.1016/j.still.2008.07.002

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong (Ed). **Física do Solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap. 2. p. 29-102.

REICHARDT; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2º ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

REDE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA. REDE ILPF. **ILPF em Números**. Disponível em: <https://redeILPF.org.br/ILPF-em-numeros/> 2020.

RIBEIRO, P. L.; BAMBERG, A. L.; REIS, D. A.; OLIVEIRA, A. C. B. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa agropecuária brasileira**, [online], v. 51, n. 9, p. 1484-1491, 2016.

ROCHA, J. V. F. Utilização da integração lavoura pecuária na recuperação de áreas degradadas. 16f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Zootecnia) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, PUC, Goiânia, Go, 2021.

RODRIGUES, M. S.; SOUZA, C.; LIMA, D. D.; SILVA, S. D. P.; ALVES, D. C.; MACHADO, N. S. Impacto do cultivo do coqueiro irrigado na qualidade física do solo na região semiárida brasileira. **Ciência del Suelo**, v. 34, n. 1, p. 139-144, 2016.

RODRIGUES, L. M.; TEODORO, A. G.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; ROCHA, J. H. T.; GIONGO, P. R.; SANTOS, Y. L. A. Integração lavoura-pecuária-floresta: interação entre componentes e sustentabilidade do sistema. **Arch. Zootec**, v. 68, n. 263, p. 448-455, 2019.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.472-479, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000500002>

SABINO, B. T. S. Propriedades físico-hídrica de um planossolo sob sistema de integração lavoura – pecuária- floresta no agreste da paraíba. 19f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, CCA, Areia, PB, 2023.

SANTOS, M. A. N.; PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Infiltração de água em na Ultisol após cultivo de feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1612-1620, 2014.

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. rev. e aum. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-817-2

SANTOS, C. M. dos. A internalização do conhecimento pelo produtor rural no âmbito do projeto de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) a partir da transferência de conhecimento da Embrapa. 2020. **Tese (Doutorado)** - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SANTOS, H. G. dos.; ZARONI, M. J. **Planossolos: definição e características gerais. Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. 2018.

SANTANA, A. S.; DOS SANTOS MOREAU, A. M. S.; OLIVEIRA, R. S.; TOMAZ, A. R.; & DOS REIS, A. D. Caracterização, aptidão agrícola e capacidade de uso de um Planossolo Háplico: um estudo de caso no município de Firmino Alves-BA. **Agri-Environmental Sciences**, v. 11, n. 1, p. 15-15, 2025.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong (ed.). **Física do Solo**. 1. ed. cap. 7, p. 241-281. ISBN 978-85-86504-06-8. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

SILVA, A. R. da; SILVA, L. L. da; FRAZÃO, J. J.; SALGADO, F. H. M.; SILVA, M. C. da; CORRECHEL, V. Resistência Mecânica À Penetração Do Solo Com Diferentes Coberturas Vegetais Sob Sistema. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v. 22, n. 2, dezembro, 2012.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 37, n. 1, p. 96-104, 2016.

SILVA, P. L. F. Atributos físicos e químicos de um planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da paraíba. 142f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, CCA, Areia, PB, 2019.

SILVA, P. L. F., DE OLIVEIRA, F. P., MARTINS, A. F., PEREIRA, W. E., TAVARES, D. D., DO AMARAL, A. J., & DA SILVA, A. J. Saúde do solo de um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta através de análise multivariada. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e2929119835- e2929119835, 2020.

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SOARES, M. B.; FREDDI, O. S.; MATOS, E. S.; TAVANTI, R. F. R.; WRUCK, F. J.; LIMA, J. P.; MARCHIORO, V.; FRANCHINI, C. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. **Catena**, v.185, 104279, 2020.

SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. Washington: **Natural Resources Conservation Service**, 10. Ed, p.80, 1993.

SOUSA, M. P.; PIRES, A. J. V.; SILVEIRA, R. B.; PUBLIO, P. P. P.; FIGUEIREDO, G. C., & CRUZ, N. T. Sistemas de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta. **Brazilian Journal of Science**, v. 1, n. 10, p. 53-63, 2022.

SOUSA NETO, A. T. de; LIMA, J. M. G. de; LIMA, A. A. da S.; OLIVEIRA, S. A. de; BARBOSA, J. M. da S.; LIMA, A. B. M.; BATISTA, A. M. A.; SILVA, P. L. F. da; OLIVEIRA, F. P. de. Sistemas de produção agropecuárias convencionais e integrados e seus impactos na qualidade física e química do solo. **Contribuciones A Las Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 17, n. 7, p. e8939, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.7-446.

SOUSA, C. S.; MAVEDO, R. S.; CARNEIRO, K. A. A.; MORO, L.; SILVA, K. C. G.; BRITO NETO, J. F.; CAMPOS, M. C. C. Caracterização física, química e mineralógica de solos sob diferentes usos em vertentes do Brejo paraibano. **Rev. Valore**, Volta Redonda, v. 8, n. especial, p. 317-224, jan./dez. 2023. <https://doi.org/10.22408/rev8020231472217-224>.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. P. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 487-492, 2006.

SOUZA, J. F. D.; BONINI, C. D. S. B.; MATEUS, G. P.; DE SOUZA, C. T.; PERUSSO, R. L. S.; PEDRO, F. G.; & OLIVERIO, G. L. Compactação do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta após cinco anos de implantação e uso. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 3, p. 348-353, 2020.

SCHEMBERGUE, A.; CUNHA, D. A. D.; CARLOS, S. D. M.; PIRES, M. V., & FARIA, R. M. (2017). Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 55(1), 9-30.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, dez. 2013.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M de C.; RIBON, A. A. Atributos físicos de Latossolo distrófico psamítico sob diferentes usos agrícolas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, p. 925-933, 2010.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos e análises de solos**. Ed3. Brasília: Embrapa, 2017, p.573.

TEZOLIN, T. de A.; MONTEIRO, F. das N.; FALCÃO, K. dos S.; MENEZES, R. da S.; XIMENES, TS; PANACHUKI, E.; CARVALHO, L.A. de. Atributos físicos do solo em diferentes sistemas de produção agrícola. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 1, pág. e5110111278, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i1.11278. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/11278>. Acesso em: 15 maio. 2025.

THAPA, V. R.; GHIMIRE, R.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; MARSALIS, M. A.; SCHIPANSKI, M. E. A. biomassa e a composição de espécies de culturas de cobertura afetam a estrutura da comunidade microbiana do solo e as atividades enzimáticas em sistemas de cultivo semiáridos. **Appl. Soil Ecol.** 2021, 157, 103735.

TORRES, E. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. **Embrapa Soja. Circular Técnico**, v. 23, p. 58, 1999.

TORRES, J.L.R.; ASSIS, R.L.; LOSS, A. Evolução entre os sistemas de produção agropecuária no Cerrado: convencional, Barreirão, Santa Fé e Integração Lavoura- Pecuária. **Informe Agropecuário**, 39:7-17, 2018.

TORRES, J. L. R. et al. Erosion control in watersheds under integrated crop-livestock-forestry systems. **Agricultural Water Management**, v. 276, p. 108075, 2023.

THORNTWAITE, C. W.; MATHER, R. J. **The water balance**. New Jersey: Laboratory of Climatology, 1955. 144p.

TREVISAN, R.; SALEMI, L. F.; MORAES, J. M.; OLIVEIRA, J. C. M. Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório. **Irriga, Botucatu**, v. 14, n. 3, p. 413-422, 2009.

VIEIRA, R. M. S. P., TOMASELLA, J., ALVALÁ, R. C. S., SESTINI, M. F., AFFONSO, A. G., RODRIGUEZ, D. A., BARBOSA, A. A., CUNHA, A. P. M. A., VALLES, G. F., CREPANI, E., DE OLIVEIRA, S. B. P., DE SOUZA, B., CALIL, P. M., DE CARVALHO, M. A., VALERIANO, D. M., CAMPELLO, F. C. B., SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, 6, 347–360, 2015.

VENDRUSCOLO, J.; RIBEIRO, T. S.; MESQUITA, F. O.; ALVES, A. S.; SANTOS, G. A. Propriedades físicas de um Latossolo e Argissolo comparadas a quatro tipos de solos na Paraíba–Brasil. **Rev. Verde**. 2011, 6, 204–212.

VILARINHO, M. K. C.; NASCIMENTO, J. C.; SILVA, T. J. A.; ISQUIERDO, E. P.; CALDEIRA, D. S. A.; OLIVEIRA, C. P. Velocidade de Infiltração Básica de um Plintossolo Pétrico Situado em Áreas de Pastagem e Cerrado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.13, nº.2, p. 3336 -3345, 2019.

VILELA, L.; BARCELLOS, A. O.; SOUSA, D. M. G. de. Benefícios da integração entre lavoura e pecuária. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, 2001. 21 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 42).

VILELA, L.; PULROLNIK, K.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARAES JUNIOR, R. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: O potencial brasileiro e o papel dos Engenheiros Agrônomos. 2015. **XXIX Congresso Brasileiro de Agronomia**. Foz do Iguaçu, PR. 2015.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of Soil Compaction on Storage and Movement of Soil Air and Water. **Transactions of the ASAE**, v.4, p. 242-246, 1961.