INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

ACURACIDADE DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Autor: Jordaanny Danyelly Pereira Lima
Orientador:Prof. Dr. Eduardo da C Severiano
Coorientadora: Prof. Drª. Kátia Aparecida de P. Costa

Rio Verde - GO
Setembro - 2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

ACURACIDADE DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Autor: Jordaanny Danyelly Pereira Lima
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano
Coorientador: Prof. Drª. Kátia Aparecida de P. Costa

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA, no Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde - Área de concentração Tecnologias sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água.

Rio Verde - GO
Setembro - 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Lima, Jordaanny Danyelly
L732a Acuracidade de indicadores de qualidade física do solo na avaliação das alterações estruturais do solo em sistemas integrados de produção agropecuária / Jordaanny Danyelly Lima ; orientador Eduardo Severiano; co-orientador kátia Aparecida Pinho Costa. -- Rio Verde, 2024.
75 f.

Tese(Doutorado em Ciências Agrárias- Agronomia) - - Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Integração lavoura-pecuária. 2. Plantio direto. 3. Compactação do solo. 4. Descompactação biológica do solo. 5. Intervalo hídrico ótimo. I. Severiano, Eduardo, orient. II. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 n°2376

INSTITUTO FEDERAL
Goiano

Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- [x] Tese (doutorado)
- [ ] Dissertação (mestrado)
- [ ] Monografia (especialização)
- [ ] TCC (graduação)
- [ ] Artigo científico
- [ ] Capítulo de livro
- [ ] Livro
- [ ] Trabalho apresentado em evento
- [ ] Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor: Jordaanny Danyelly Pereira Lima

Matrícula: 2018202320140051

Título do trabalho: ACURACIDADE DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: [x] Não [ ] Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 27 /09 /2024

O documento está sujeito a registro de patente? [ ] Sim [x] Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? [ ] Sim [x] Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde — Local

27 /09 /2024 — Data

Assinatura do Discente

Documento assinado digitalmente
govbr
EDUARDO DA COSTA SEVERIANO
Data: 30/09/2024 15:20:48 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Assinatura do(a) autor(a)

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Ata nº 101/2023 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA Nº/115
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE

Aos vinte e nove dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e três, às 07h30, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: sob a presidência do primeiro, Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente); Prof.ª Dr.ª Kátia Aparecida de Pinho Costa (Avaliadora interna); Prof. Dr. Adriano Carvalho Costa (Avaliador externo); Prof.ª Dr.ª Vladia Correchel (Avaliadora externa); Prof.ª Dr.ª Adriana Aparecida Ribon (Avaliadora externa) em sessão pública realizada no IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de **JORDAANNY DANYELLY PEREIRA LIMA,** discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente), que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida a autora da Tese para, em 40 min, proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu a examinada, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA,** na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente)

Prof.ª Dr.ª Kátia Aparecida de Pinho Costa (Avaliadora interna)

Prof. Dr. Adriano Carvalho Costa (Avaliador externo)

Prof.ª Dr.ª Vladia Correchel (Avaliadora externa)

Prof.ª Dr. ª Adriana Aparecida Ribon (Avaliadora externa)

Documento assinado eletronicamente por:

- Eduardo da Costa Severiano, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/10/2023 14:44:57.
- Katia Aparecida de Pinho Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/12/2023 11:30:49.
- Adriano Carvalho Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/12/2023 14:05:45.
- Vladia Correchel, Vladia Correchel - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Goiás (01567601000143), em 02/01/2024 12:05:07.
- Adriana Aparecida Ribon, Adriana Aparecida Ribon - Professor Avaliador de Banca - Ueg (01112580000171), em 02/02/2024 10:59:39.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/09/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 534903
Código de Autenticação: 3d0cac3731

"Os eruditos são aqueles que leram coisas nos livros, mas os pensadores, os gênios, os fachos de luz e promotores da espécie humana são aqueles que as leram diretamente do livro do mundo".

(Schopenhauer)

"Quando você conseguir superar graves problemas de relacionamento, não se detenha na lembrança dos momentos difíceis, mas na alegria de haver atravessado mais esta prova em sua vida. Quando sair de um longo tratamento de saúde, não pense no sofrimento que foi necessário enfrentar, mas na benção de Deus que permitiu a cura.
Leve na sua memória, para o resto da vida as coisas boas que surgiram nas dificuldades. Elas serão uma prova de sua capacidade, e lhe darão confiança diante de qualquer obstáculo."

(Chico Xavier)

DEDICO

A Deus, pela fortaleza e misericórdia insondáveis;
Aos meus pais, Maria Madalena e Allan Rosaldo (*in memoriam*), e meu esposo Alexandre Marques e minha filha amada Sophya Lima e meus irmãos Jacqueline Onassis e Jardell Victor, meus cunhados Samara Bortoli, Rones Fernandes, e minhas sobrinhas Izadora, Hanayane, Geovana e Lavinia e ao meu amigo Gilvan Tavares pelo amor, apoio e motivação incondicionais,

OFEREÇO

A todos familiares e amigos, pela torcida e orações, Ao

meu orientador Eduardo Severiano,

pela paciência e contribuição,

AGRADECIMENTOS

Gratidão, primeiramente a Deus e pelo Amor Misericordioso do Senhor Jesus, que me protegeu e manteve animada e motivada para enfrentar as inúmeras dificuldades no decorrer do caminho.

Gratidão aos meus pais Allan Rosaldo de Freitas Lima (*in memoriam*) e Maria Madalena Pereira Lima, que sempre acreditaram no meu potencial apoiando em todas as decisões que tomei no decorrer da minha vida acadêmica. Ao meu esposo Alexandre Marques Fernandes, que além de me apoiar, ouviu e aconselhou todos os dias. A minha filha Sophya Lima Fernandes por tornar minha vida mais feliz. Aos meus irmãos Jacqueline Onassis Pereira Lima e Jardell Victor Pereira Lima, que sempre me apoiam com palavras motivadoras e mão de obra. A minhas sobrinhas Hanayane, Isadora, Geovana e Lavinia que me auxiliaram e motivaram. Aos meus cunhados Samara Bortoli e Rones Silva, pela ajuda com mão de obra e amizade. Também agradeço ao esposo da minha mãe, Gilvan Tavares, que ajudou no experimento perdido devido a entrada de animais, apoiou e não me deixou desistir em momentos difíceis.

Gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Severiano, por acreditar em mim e apoiar quando manifestei meu sonho de seguir carreira acadêmica. Sei que não foi fácil adequar nossos horários! Obrigada pelo aceite de contribuir com meu crescimento profissional e pessoal e pelos conhecimentos que transferiu desde a graduação.

Minha gratidão aos amigos que conquistei no IF Goiano: Marlete, Josué, Leonardo, Victória, Carlos Alexandre, Aline, Tatiana, Fausto, Savio, Lucas Freitas e Paulo Henrique. Muito mais que colegas do Laboratório de Física do Solo, verdadeiros companheiros de dias labutados a campo, de lágrimas e alegrias, de conhecimentos partilhados e piadas amenizadoras. Sem a ajuda de vocês não seria possível essa conclusão. Agradeço ao técnico do Laboratório Wainer Gomes, por ser meu amigo nas horas difíceis e nos momentos de alegria, também agradeço pelos conselhos, por suas contribuições intelectuais, pela ajuda nos procedimentos das análises.

Agradeço ao Instituto Federal Goiano e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pela oportunidade de cursar o Doutorado numa instituição com qualidade e estrutura ascendentes e na minha cidade natal, sinto-me em casa na instituição, pois cresci estudando aqui, fiz técnico em agropecuária e agronomia e mestrado e o doutorado.

Gratidão aos setores de Mecanização e Gerência de Produção, coordenadas pelo Wenner e José Flávio. Obrigada pela ajuda com insumos, trator, implementos e serviço; vocês foram essenciais na implantação e conclusão desse projeto.

Agradeço à coorientação da Prof.ª Dr.ª Kátia Aparecida Pinho Costa e suas contribuições,

sobretudo por ceder a infraestrutura do Laboratório de Forragicultura e seus alunos orientados, permitindo a realização das análises desse trabalho. Agradeço também ao Prof. Dr. Adriano Carvalho Costa - IF Goiano, a Profa. Dra. Adriana Aparecida Ribon - UEG e a Profa. Dra. Vladia Correchel - UFG, por aceitarem participar da banca examinadora e pelas contribuições ao presente estudo.

Agradeço aos demais professores e servidores do Programa de Pós-Graduação que foram também amigos nas horas de necessidades. Obrigada, Prof. Frederico Loureiro, Prof. Carlos Rodrigues, Prof. Gustavo Castoldi, Prof. Alan Carlos, Prof. Paulo Eduardo, Prof. Juliana Sales, Prof. Adriano Jakelaitis, Prof. Alessandro Guerra, Prof Tavvs e Prof Danilo Pereira, e de modo especial à secretária do curso Vanilda. Também aos meus professores da graduação Prof. João Cléber Modernel, pela amizade e apoio desde a graduação, Prof. Marconi, obrigada pelas conversas de corredor e ao Prof. Márcio Peixoto que desde a graduação sempre me aconselhou e me ouviu.

Agradeço aos parceiros que forneceram insumos do Grupo GAPES.

Enfim, gratidão a todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para esse momento e que talvez pela débil memória não consegui contemplar nestas linhas.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Jordaanny Danyelly Pereira Lima, filha de Allan Rosaldo de Freitas Lima e Maria Madalena Pereira Lima, nascida em 03 de maio de 1987 na cidade de Rio Verde, no estado de Goiás.

Entre os anos de 2003 a 2005, cursou o ensino médio concomitante ao Técnico Agrícola no Instituto Federal Goiano – CAMPUS Rio Verde. Iniciou a graduação em Administração com Habilitação em Agronegócio em 2006 na Faculdade Almeida Rodrigues – FAR, concluiu no segundo semestre de 2009. No ano de 2010, iniciou MBA Gestão Empresarial com Ênfase em Estratégia na Pontifícia Universidade Católica de Goiás, PUC GOIÁS, Goiânia concluiu no primeiro semestre de 2011.

No ano de 2011, iniciou Graduação em Agronomia no Instituto Federal Goiano – CAMPUS Rio Verde, desenvolveu atividades de ensino, pesquisa e extensão como bolsista Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e também foi bolsista do PIBIC no laboratório de Física dos Solos.

Em setembro de 2016, iniciou no Programa de Pós-Graduação *Strictu sensu* em Ciências Agrárias - Agronomia, nível de mestrado, no Instituto Federal Goiano – CAMPUS Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano. A defesa da dissertação ocorreu em 21 de agosto 2018.

Em setembro de 2018, ingressou no Programa de Pós-Graduação *Strictu sensu* em Ciências Agrárias - Agronomia, nível de doutorado, no Instituto Federal Goiano – CAMPUS Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano. A defesa da tese ocorreu em 29 de setembro 2023

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELA.....xiv
ÍNDICE DE FÍGURAS.....xv
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIAÇÕES E UNIDADES.....xvii
RESUMO.....viii
ABSTRACT.....ix
1 INTRODUÇÃO GERAL.....19
1. 1 Compactação dos Latossolos……...19
1.2 Integração lavoura pecuária……..20
1.3 Qualidade física do solo……21
1.4 Referências bibliográficas…….22
2 OBJETIVOS.....26
2.1 Objetivo Geral……...26
2.2 Objetivos Específicos……26
3 CAPÍTULO I.....27
CROP-LIVESTOCK INTEGRATION SYSTEMS MITIGATE SOIL COMPACTION AND INCREASE SOYBEAN YIELD.....27
SUMMARY.....27
3.1 INTRODUCTION.....28
3.2 MATERIALS AND METHODS.....29
3.4 RESULTS.....35
3.5 DISCUSSION.....41
3.6 CONCLUSIONS.....46
REFERENCES.....46
4 CAPÍTULO II.....53
SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM LONGA DURAÇÃO PROMOVEM A SAÚDE FÍSICA DO SOLO.....53
RESUMO.....53
ABSTRACT.....53
4. 1 INTRODUÇÃO.....54
4. 2 MATERIAL E MÉTODOS.....55
4. 2.1 Caracterização da área experimental 55
4.2.2 Protocolo de amostragem e análises de solo.....58
4.2.3 Análise estatística 60
4. 3 RESULTADOS.....62
4. 4 DISCUSSÃO.....66

4. 5 CONCLUSÕES.....71
4. 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....71

ÍNDICE DE TABELA

CAPÍTULO I. CROP-LIVESTOCK INTEGRATION SYSTEMS MITIGATE SOIL COMPACTION AND INCREASE SOYBEAN YIELD.....27

Tabela 1. Physical and chemical characterization of the Latossolo Vermelho Acriférrico típico from the Brazilian Cerrado during soybean sowing, 2014/2015 harvest……..31

Tabela 2. Comparison between the linearized regressions of curves of soil compression as a result of agricultural equipment traffic before and after the implementation of monoculture and intercropping management systems in a Latossolo Vermelho Acriférrico típico……35

CAPÍTULO II SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM LONGA DURAÇÃO PROMOVEM A SAÚDE FÍSICA DO SOLO.....53

Tabela 1. Histórico de uso do solo dos sistemas cultivados na área experimental em estudo desde 1991 até a época da colheita das amostras de solo……..57

Tabela 2. Atributos indicadores da qualidade física avaliados em um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos à diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos…….....61

Tabela 3. Teste de Skott-Knott dos escores obtidos da primeira e segunda dimensão dos componentes principais para atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos……..65

Tabela 4. Efeitos diretos e indiretos, correlação e coeficiente de determinação (R2) de diagrama causal da regressão múltipla de determinação da densidade do solo relativa em função dos atributos indicadores físicos……65

ÍNDICE DE FÍGURAS

CAPÍTULO I CROP-LIVESTOCK INTEGRATION SYSTEMS MITIGATE SOIL COMPACTION AND INCREASE SOYBEAN YIELD.....27

Figure 1. Location of the experimental area in Rio Verde, Goiás, Brazil, Cerrado Biome……30

Figure 2. Precipitation (mm) and average daily temperature (°C) during the soybean cycle, 2014/2015 harvest, in the municipality of Rio Verde, Goiás, Brazil……33

Figure 3. Impact of agricultural tractor traffic [Bulk density (kg dm-3) as a function of the number of passes (N)] before and after the implementation of management systems in monoculture (grain and pasture) and intercropped in a Latossolo Vermelho Acriférrico……36

Figure 4. Variation in soil water content (θ) as a function of increasing bulk density (Bd) at critical field capacity (θ_{FC}: ψ_m = -0.006 MPa), permanent wilting point (θ_{PWP}: ψ_m = -1.5 MPa), aeration porosity of 0.10 dm^3 dm^{-3} (θ_{AP}) and penetration resistance of 2.5 MPa (θ_{PR}) limits (A) and variation in the least limiting water range (LLWR) with increasing Bd (B) in the 0-0.15 m layer of the Latossolo Vermelho Acriférrico típico of the Brazilian Cerrado due to agricultural tractor traffic in monoculture systems (grains and pasture) and intercropping systems. The hatched area represents the LLWR;ψ_m: matrix potential; Bd_{alert}: bulk density at which the first reduction in available water occurs; Bd_c: bulk density at which the LLWR = 0; T0 = 0, T2 = 2, T10 = 10, and T30 = 30 passes over the same area of an agricultural tractor weighing 4.5 Mg……..37

Figure 5. Phenological development and grain yield of soybean plants as a function of bulk density in monoculture (grain and pasture) and intercropped management systems in a Latossolo Vermelho Acriférrico típico. A: Plant height; B: number of scars per plant; C: number of pods per plant; D: number of grains per pod; E: weight of 1000 grains and; F: grain yield per hectare……..38

Figure 6. Variation in soil penetration resistance as a function of soil water content and relative yield of soybean plants in a grain management system under monoculture (A), integrated agriculture and livestock (B) and pasture in monoculture (C) in a Latossolo Vermelho Acriférrico típico in the Brazilian Cerrado.……...40

Figure 7. Variation in soil water content (θ) as a function of increasing bulk density (Bd) at critical field capacity (θ_{FC}: ψ_m = 0.006 MPa), permanent wilting point (θ_{PWP}:ψ_m:-1.5 MPa), aeration porosity of 0.10 dm^3 dm^{-3} (θ_{AP}) and penetration resistance (PR) of 1.6, 2.0 and 2.4 MPa (θ_{PR}) limits (A) and variation in the least limiting water range (LLWR) with increasing Bd (B) in the layer of 0-0.15 m of a Latossolo Vermelho Acriférrico típico of the Brazilian Cerrado due to agricultural tractor traffic in monoculture systems (grains and pasture) and intercropped systems. The hatched area represents the LLWR……41

CAPÍTULO II SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM LONGA DURAÇÃO PROMOVEM A SAÚDE FÍSICA DO SOLO.....53

Figura 1. Localização da área experimental em Planaltina, Distrito Federal, Brasil, Bioma Cerrado……56
Figura 2. Correlações entre os atributos de qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos…….62
Figura 3. Dispersão bidimensional dos escores da análise de componentes principais de 15 variáveis avaliadas (a), e correlação dos atributos físicos em todas as dimensões (B) em um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos……63
Figura 4. Contribuição das variáveis com o primeiro (A) e o segundo componente principal (B) de um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos……..64
Figura 5. Diagrama causal mostrando as correlações entre as variáveis independentes e as relações causa-efeito com a densidade relativa……..66

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIAÇÕES E UNIDADES

θ	conteúdo de água no solo ($dm^3\ dm^{-3}$)
θ_{CC}	conteúdo de água na capacidade de campo ($dm^3\ dm^{-3}$)
θ_{PMP}	conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($dm^3\ dm^{-3}$)
θ_{RP}	conteúdo de água na resistência do solo à penetração ($dm^3\ dm^{-3}$)
θ_{PA}	conteúdo de água na porosidade de aeração a 10% ($dm^3\ dm^{-3}$)
Ψ	POTENCIA MATRICIAL (Kpa)
°C	graus Celsius
° ,, “	graus minutos segundos
“	Polegadas
%	por cento
Ag.	*Andropogon gayanus*
AD	Água disponivel
LAV-C	lavoura continua sob plantio convencional
LAV-D	lavoura continua sob plantio direto
Bb	*Brachiaria brizanthe*
Bd	*Brachiaria decumbens*
CC	capacidade de campo ($dm^3\ dm^{-3}$)
CN	cerrado nativo
COR	corredor de manejo
CRA	curva de retenção de água
CRP	curva de resistência à penetração
Aw	verão chuvoso
Ca^{2+}	íon cálcio
$CaCl_2$	cloreto de cálcio
Ccm	centímetros de coluna de água
Cm	Centímetro
$cmol_c\ dm^{-3}$	centimol de carga por decímetro cúbico
cv.	Cultivar
cv.	cavalo vapor
CV	Coeficiente de Variação
$dm^3\ dm^{-3}$	decímetro cúbico por decímetro cúbico
Dp	densidade de partículas ($kg\ dm^{-3}$)
DAS	dias após a semeadura
DMA	desvio médio absoluto
Ds	densidade do solo ($kg\ dm^{-3}$)
Ds_c	densidade do solo crítica ($kg\ dm^{-3}$)
Ds_b	densidade do solo benéfica ($kg\ dm^{-3}$)
Ds_L	densidade do solo limitante (kg dm-3
Ds_R	densidade do solo relativa (kg dm-3)
Eq.	Equação
et al.	e colaboradore
g	Gramas
$g\ kg^{-1}$	gramas por quilo
H	Horas
Há	Hectare

$H^+ + Al^{3+}$	hidrogênio mais alumínio
IHO	intervalo hídrico ótimo
ILP	Integração lavoura pecuária
K_2O	óxido de potássio
kPa	kilo Pascal
K^+	íon potássio
Kg	Quilograma
kg dm^{-3}	quilograma por decímetro cúbico
Mg ha^{-1}	Megagrama por hectare
kg kg-1	quilograma por quilograma
L ha^{-1}	litros por hectare
Mg	Megagrama
M	Metro
m^2	metro quadrado
m^3	metro cúbico
Mg^{+2}	íon magnésio
mg dm^{-3}	miligrama por decímetro cúbico
Mg m^{-3}	megagrama por metro cúbico
Mm	Milímetros
mm min^{-1}	milímetros por minuto
MPa	mega Pascal
MOS	matéria orgânica do solo
n	número de amostras
ns	não significativo
N	Nitrogênio
NDF	número de dias para florescimento
NDM	número de dias à maturação
P_2O_5	pentóxido de fósforo
PAST	Pastagem
PMP	ponto de murcha permanente (dm^3 dm- ^{3})
pH	potencial de hidrogênio
P	Fósforo
PT	porosidade total do solo
RP	resistência do solo à penetração
R^2	coeficiente de determinação
S	Enxofre
SPD	sistema de plantio direto
ton ha-1	- tonelada por hectare
T0	tempo zero
SIL-C	sistema integrado lavoura-pastagem, fase lavoura, plantio convencional
SIL-D	sistema integrado lavoura-pastagem fase lavoura, plantio direto
SIP-D	sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem, plantio direto
SPD	sistema de plantio direto
T1	tempo um
T2	tempo dois
T3	tempo três
T4	tempo quatro
W	Oeste
Zn	Zinco

RESUMO

LIMA, JORDAANNY DANYELLY PEREIRA. **Acuracidade de indicadores de qualidade física do solo na avaliação das alterações estruturais do solo em sistemas integrados de produção agropecuária.** 2023. 76p**.** Tese. Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia. Instituto Federal Goiano- Campus Rio Verde – GO, Brasil.

O sistema de integração lavoura pecuária juntamente com sistema de plantio direto é uma das alternativas de produção conservacionistas que os produtores têm buscado para aumentar a produtividade e reduzir a degradação do solo. No entanto, a diagnose da estrutura do solo, ainda carece de refinamentos no que diz respeito à escolha do atributo indicador que melhor representa as características do ambiente edáfico. Esta tese de doutorado propõe avaliar a acuracidade de indicadores de qualidade física do solo na avaliação das alterações estruturais do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária. Para tanto, foram realizados dois estudos que constituem seus capítulos. No primeiro capítulo, com o objetivo de avaliar o potencial de descompactação biológica do solo pelo capim-paiaguás e a eficácia de sistemas integrados na performance agronômica da soja, foi implantada a cultura da soja sob três sistemas de manejo (simples: grãos monocultivo e integrados: consorcio entre capim e grãos e a pastagem em monocultivo). Foram determinados a densidade do solo (Ds) e intervalo hídrico ótimo (IHO), os quais indicaram que os sistemas integrados de produção agropecuária amenizaram a compactação do solo e melhoraram o desenvolvimento da soja. A adoção do capim-paiaguás em monocultivo potencializou os benefícios edáficos e possibilitou maior produção de grãos em relação ao sistema simples de sucessão de grãos. Já o IHO mostrou-se eficiente na modelagem do comportamento físico do solo, este estudo avançou, também em aprimorá-lo em relação aos valores de referência de resistência a penetração específicos para cada sistema de manejo. No segundo estudo, cujo objetivo foi a eficácia de 21 atributos físicos indicadores de qualidade estrutural em um Latossolo Vermelho cultivado por longo prazo e em diferentes sistemas integrados de produção, além de estabelecer relações funcionais agronômicas e ambientais. Para tanto, foram avaliados oito tratamentos, pastagem contínua, integração lavoura pecuária sob sistema convencional, integração lavoura pecuária sob plantio direto, integração pecuária-lavoura, fase pecuária sob plantio direto, lavoura contínua sob sistema convencional, lavoura contínua sob plantio direto, cerrado nativo. Foram retiradas amostras de solo deformadas e indeformadas nas 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. O uso e o manejo afetaram de forma diferencial a qualidade física do solo. Os sistemas integrados de produção agropecuária mostraram-se adequados, com destaque àqueles sob plantio direto. As camadas subsuperficiais tiveram a maior sensibilidade às alterações estruturais, podendo ser consideradas na diagnose física do solo. De todos os atributos avaliados, a macroporosidade mostrou-se como o de maior eficácia por ser primeiramente atingido pela compactação do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Integração lavoura-pecuária, plantio direto, compactação do solo, descompactação biológica do solo, intervalo hídrico ótimo, macroporosidade

ABSTRACT

LIMA, JORDAANNY DANYELLY PEREIRA. **Accuracy of soil physical quality indicators in the assessment of soil structural changes in integrated agricultural production systems.** 2023. 76 p. Thesis (Doctorate in Agricultural Sciences – Agronomy. Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde – GO, Brazil).

The crop-livestock integration system together with the direct planting system is one of the conservationist production alternatives that producers have sought to increase productivity and reduce soil degradation. However, the diagnosis of soil structure still needs refinements when it comes to choosing the indicator attribute that best represents the characteristics of the soil environment. This doctoral thesis aims to evaluate the accuracy of soil physical quality indicators in the assessment of soil structural changes in integrated agricultural production systems. To this end, two studies were carried out that constitute its chapters. In the first chapter, with the objective of evaluating the potential for soil biological decompression by paiaguás grass and the effectiveness of integrated systems in the agronomic performance of soybeans, soybean cultivation was implemented under three management systems (simple: monoculture grains and integrated: intercropping between grass and grains and pasture in monoculture). Soil density (Ds) and optimal water range (IHO) were determined, which indicated that integrated agricultural production systems alleviated soil compaction and improved soybean development. The adoption of paiaguás grass in monoculture enhanced the soil benefits and enabled greater grain production compared to the simple grain succession system. While the IHO proved to be efficient in modeling the physical behavior of the soil, this study also advanced in improving it in relation to the penetration resistance reference values specific to each management system. In the second study, the objective was the effectiveness of 21 physical attributes indicating structural quality in a Red Latosol cultivated long-term and in different integrated production systems, in addition to establishing agronomic and environmental functional relationships. To this end, eight treatments were evaluated: continuous pasture, crop-livestock integration under conventional system, crop-livestock integration under direct planting, livestock-crop integration, livestock phase under direct planting, continuous cropping under conventional system, continuous cropping under direct planting, native cerrado. Deformed and undisturbed soil samples were taken at 0.00-0.05; 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m. Use and management differentially affected the physical quality of the soil. Integrated agricultural production systems proved to be adequate, especially those under direct planting. The subsurface layers had the greatest sensitivity to structural changes and can be considered in the soil physical diagnosis. Of all the attributes evaluated, macroporosity proved to be most effective as it is primarily achieved by soil compaction.

KEYWORDS: Crop-livestock integration, direct planting, soil compaction, biological soil decompaction, optimal water range, macroporosity.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Em meados de 1914 a produção de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) foi introduzida no Brasil, iniciando pelo estado do Rio Grande do Sul, e desde então o campo de produção foi expandindo e hoje tornou-se uma das principais *commodities* exportada, de extrema importância para economia nacional (Dalchiavon *et al*., 2011). A produção estimada de 2022/2023 foi de 315,8 milhões de toneladas (Conab, 2023), parte desta produção foi destinada à exportação, mantendo o Brasil como 2º maior produtor mundial.

Sendo que 71,82 milhões de toneladas da produção nacional são atribuídas à região do Centro-Oeste brasileiro, principalmente recoberto pelo bioma do Cerrado e com solos classificados como Latossolos, (Conab, 2023; Silva *et al*., 2020). Os Latossolos do Cerrado podem aumentar a produção agrícola através de técnicas de correção e mecanização com altas tecnologias (Rada *et al*., 2013; Torino *et al*., 2020), mesmo que esses solos possuam características de baixa fertilidade, altos teores de ferro e elevada suscetibilidade à compactação (Severiano *et al.*, 2013).

O Latossolo favorece o uso de práticas mecanizadas em razão do relevo suavizado, com isso os produtores têm intensificado a mecanização durante as etapas de produção, não levando em consideração as limitações físico-hídricas do solo, que por sua vez degrada da estrutura do solo, causa a compactação (Severiano *et al*., 2013).

1. 1 Compactação dos Latossolos

A estrutura do solo é responsável por funções como retenção de água, infiltração, resistência do solo à penetração das raízes, matéria orgânica e suscetibilidade à erosão (Rabot *et al*., 2018). Inicialmente muitos campos de produção do Cerrado eram matas nativas, essa transição de áreas sem os devidos cuidados e preparo intensivo levou à perda da qualidade física do solo (Stefanoski *et al*., 2016), bem como a compactação e a degradação da matéria orgânica.

Esta compactação altera a estrutura do solo, reduzindo o volume de solo não saturado, quando aplicado pressão externa, ocasionando a reorganização das partículas, aumento da densidade (Dias Júnior *et al*., 2019), e consequentemente o aumento da resistência do solo à penetração, que por sua vez, em Latossolos oxídicos é um dos fatores limitante na disponibilidade de água às plantas (Severiano *et al*., 2011).

Todavia em Latossolos o tráfego de máquinas agrícolas, preparo intensivos de solo, tráfego sob condições de elevada umidade, bem como o pisoteio animal excessivo são os fatores que mais afetam a compactação do solo (Rossetti e Centurion, 2017). Tais fatores afetam principalmente a camada de 0 a 0,20 m em solos agrícolas e com pastagens, prejudicando a biota do solo, restringindo

o crescimento das raízes, diminuindo a capacidade de infiltração da água no solo e a translocação de nutrientes (Rabot *et al*., 2018).

O preparo convencional do solo, quebra a estrutura através do revolvimento pela aragem e gradagem, promove a redução da capacidade de suporte de carga (Guimarães Júnnyor *et al*., 2019). Por outro lado, o pisoteio animal pode compactar de forma semelhante (Greenwood e McKenzie , 2001). Alguns parâmetros são relevantes para a quantificação da resistência à penetração como tipo de solo, distribuição de tamanhos e formas de partículas, mineralogia de argila, teor de matéria orgânica e a química da solução do solo (Bayat e Zadeh, 2018), além da densidade e do conteúdo de água no solo.

A resistência a penetração do solo é fator limitante para o crescimento da planta, por isso, muitas pesquisas adotam o valor padrão para a resistência do solo à penetração de 2Mpa (Arshad *et al*., 1996). Ao pesquisar um Latossolo Vermelho foi observado valores de resistência a penetração de 3,0 MPa e 5,0 MPa, que promoveram redução 10% e 38% na produtividade da soja. Por outro lado, valores de 2,65 e 3,26 Mpa, não proporcionaram decréscimos na produtividade da cultura da soja (Girardello *et al*., 2014; Secco *et al*., 2009).

Com isso, observa-se a importância de utilizar valores específicos de resistência a penetração, para cada cultura, levando em consideração a interação do sistema solo-planta-sistema de produção (Tormena *et al*. 2008; Stefanoski *et al*. 2013). A planta tem características próprias que pode ser influenciada, por sua genética, pelo solo e o sistema de manejo anterior ao plantio, estes fatores devem ser avaliados juntos (Lima *et al*., 2023). Essa interação dos sistemas de produção, demostra a importância da busca por sistemas que beneficiam a estrutura do solo, com agregados maiores e estáveis, que aumentem a resistência às pressões externas e reduz as perdas por erosão (Salton *et al*., 2008). Neste contexto, o sistema de integração lavoura-pecuária, pode promover a sustentabilidade do sistema de produção e melhorar a produtividade.

1.2 Integração lavoura pecuária

Em busca de tornar as áreas do Brasil mais produtiva, começou-se a utilizar técnicas relacionadas à agricultura conservacionista, para manter o equilíbrio agroambiental e preservar os recursos naturais. Com isso, ressaltam-se os benefícios do sistema de integração lavoura pecuária (ILP), que mostra a interação dos fatores biológicos, econômicos e sociais (Cunha *et al*., 2012), ampliando as estratégias de produção na mesma área (Alvarenga *et al*., 2007).

O ILP é considerado um sistema de produção sustentável que integra a produção agrícola com a pecuária, normalmente cultiva grãos com importância econômica como a soja em seguida a forrageira para alimentação dos animais ou cobertura do solo (Ambus *et al*., 2018). O sistema também melhora os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, aumenta a ciclagem e a eficiência de

utilização dos nutrientes, quebra de ciclo de doenças, reduz a quantidade de insetos-pragas e plantas daninhas (Franchini *et al*., 2015; Ambus *et al*., 2018), reduz o custo de recuperação e renovação de pastagens em processo de degradação, melhora a cobertura do solo para o plantio direto (Vilela *et al*., 2011; Franchini *et al*., 2015), diversificando e estabilizando a renda na propriedade rural.

Dentre os sistemas de ILP utilizados no Brasil, o cultivo consorciado de espécies forrageiras tropicais, como a *Brachiaria*, destaca-se pela alta relação C/N, pois, possibilita maior tempo de meia-vida (Flávio Neto *et al*., 2015; Lima *et al*., 2023). Neste sistema após a fase de pastejo, é realizada a dessecação para formação de biomassa e posteriormente plantio da cultura principal como a soja. Que vem sendo muito utilizada, por apresentar capacidade de adaptar-se às condições ambientais e de manejo, por meio de modificação na morfologia da planta e nos componentes de rendimentos, por causa da alta plasticidade (Ferreira Júnior *et al*., 2010; Lima *et al*., 2023).

Estas modificações podem ocorrer relacionadas aos fatores de produção como altitude, latitude, textura do solo, fertilidade do solo, época de semeadura, população de plantas e espaçamento entrelinhas. Sendo importante conhecer as interações entre estes fatores, para planejar e definir qual o conjunto de práticas que venha a responder melhor a produtividade agrícola da lavoura (Hotz *et al.*, 2014). Para obter a máxima produtividade precisa-se de três fatores: planta - solo – manejo de produção. Por isso, além de estudar as características genéticas da planta e o comportamento no sistema de produção, são necessários estudos aprofundados da qualidade física do solo, mostrando como ocorre a interação planta-solo-sistema de produção agrícola (Lima *et al*., 2023).

1.3 Qualidade física do solo

Qualidade física do solo refere-se à capacidade do solo em desempenhar as funções para garantir o crescimento e desenvolvimento das plantas (Tormena *et al*., 1998). Para avaliar a qualidade física do solo em diferentes sistemas de uso e manejo deve-se realizar estudos diretamente ligados a forma e estabilidade estrutural do solo, como a densidade, porosidade, resistência à penetração e a distribuição e estabilidade dos agregados do solo (Tormena *et al.*, 2008; Stefanoski *et al*., 2013).

Os atributos físicos do solo estão diretamente relacionados à produtividade das culturas, um solo ideal para o crescimento e desenvolvimento das plantas, deve possibilitar maior área de contato, entre as raízes e o solo, apresentar espaço poroso suficiente e contínuo para a movimentação da água e dos gases (Rabot *et al.*, 2018). Além disso, que a resistência do solo à penetração não cause impedimentos no crescimento das raízes. Entretanto, as relações entre desenvolvimento e produtividade das culturas com a estrutura do solo depende de outros fatores de produção, como condições climáticas adequadas (Stefanoski *et al.*, 2013), características genéticas e morfológicas da planta e o manejo de produção anterior ao plantio (Lima *et al*., 2023).

O intervalo hídrico ótimo ou “Least Limiting Water Range” é um dos indicadores que vem sendo utilizado para mensurar a qualidade física do solo e estudar a interação planta-solo-sistema de produção (Calonego *et al.*, 2011; Silva *et al*., 2019). O IHO é determinado a partir das curvas de retenção de água do solo e da curva de resistência do solo à penetração. Assim, estima-se, para cada valor de Ds, o conteúdo de água na capacidade de campo (θCC), no ponto de murcha permanente (θPMP), o conteúdo de água que assegure determinado valor de resistência do solo à penetração (θRP) e a porosidade mínima livre de água que garanta a adequada aeração no solo (θPA) (Tormena *et al*. 2007; Torino *et al*., 2020).

O IHO está diretamente ligado à densidade do solo, geralmente quando ocorre aumento da Ds advém a redução do IHO, sugerindo que as condições físicas do solo são limitantes às plantas. O valor de densidade do solo em que o IHO torna-se nulo (IHO=0) reflete que as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular da planta. Esse valor de densidade é considerado como a densidade do solo crítica (Dsc) (Silva *et al*., 2019). Portanto o IHO é utilizado para avaliar, a disponibilidade de água, a resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração sobre o crescimento das culturas (Torino *et al*., 2020).

O sistema de manejo em que o solo se encontra submetido deve contribuir para manutenção ou melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas (Denardin, 2014; Vezzani *et al*., 2018) a fim de proporcionar adequadas produtividades das culturas durante as safras com o consequente aumento da rentabilidade (Costa *et al*.; 2006). A adoção de sistema conservacionista de manejo do solo como o plantio direto (Costa et al., 2014), juntamente com o sistema ILP, tem possibilitado a melhoria dos atributos físicos, biológicos e químicos do solo (Vezzani *et al*., 2018).

1.4 Referências bibliográficas

ALVARENGA, R. C. et al. A cultura do milho na integração lavoura-pecuária. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 233, p. 106-126, 2006.

AMBUS, J.V., REICHERT, J.M., GUBIANI, P.I., CARVALHO, P.C.F., Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p. 232–243, 2018. DOI: org/10.1016/j.geoderma.2018.06.005.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, R. Physical test for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. Madison: SSSA, **Soil Science Society of America**, v. 49, p. 123-141, 1996.

BAYAT, H.; ZADEH, G.E. Estimation of the soil water retention curve using penetration resistance curve models. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 144. p. 329 – 343. 2018.

CALONEGO, J.C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL C.A.C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com o cultivo de milho e braquiária. **Revista Brasileira Ciências Solo**, v. 35, p. 2183-2190, 2011. DOI: http: org/10.1590/S0100-06832011000600033.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos*. Brasília, DF: Conab.,2023.

COSTA; N.V.; PERES, E.J.L.; RITTER, L.; SILVA, P.V.O. Doses de glyphosate na dessecação de *Urochloa ruziziensis* antecedendo o plantio do milho. **Scientia Agraria**, v.13, n.2, p.117-125, 2014.

CUNHA, E.D.Q.; STONE, L.F.; FERREIRA, E.P.D.B.; DIDONET, A.D.; MOREIRA, J.A.A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 56-63, 2012. DOI: org/10.1590/S1415-43662012000100008

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; NOGUEIRA, D.C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F.L.; 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. DOI: org/10.5216/pat.v41i1.8351

DENARDIN, L.A.O., BONETTI, J.A., TONI, C.A.G., BORIN, J.B.M. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 47, p. 2018. DOI:org/10.1590/rbz4720170001.

Dias Júnior, M.S., Tassinari, D. Martins, P.C.C. Compactação Do Solo – Atualização In: Severiano, E.C., Moraes, M.F., Paula, A.M., Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Minas Gerais: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.10. p. 2019.

FERREIRA JUNIOR J.A; ESPINDOLA, D.M.C.G; GONÇALVES, D.A.R; LOPES, E.W. Avaliação de genótipos de soja em diferentes épocas de plantio e densidade de semeadura no município de Uberaba - MG**. FAZU em Revista,** v. 7, p. 13-21, 2010. DOI: org/10.5965/223811711712018061

FLÁVIO NETO, J., SEVERIANO, E.C., COSTA, K.A.P., GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S., GONÇALVES, W.G., ANDRADE, R., Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. **Acta Scientiarum Agronomy**. v.37, p.375–383, 2015. DOI:10.4025/actasciagron.v37i3.19392.

FRANCHINI, J.C., JUNIOR BALBINOT, A. A.; DEBIASI, H.; CONTE, O. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 50, n. 12, p. 1131-1138, 2015. DOI: org/10.1590/S0100-204X2015001200002

GIRARDELLO, V. V; AMADO, T. J. C; SANTI, A. L; CHERUBIN, M. R; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. G. Penetration resistance, efficiency of mechanical scarifiers and soybean yield in clayey Oxisol managed under long-term no-tillage. **Brazilian Journal of Soil Science**, v. 38, p.1234-1244, 2014. DOI.org/10.5539/jas.v10n4p268

GONÇALVES, W.G., SEVERIANO, E.C., SILVA, F.G., COSTA, K.A.P., GUIMARÃES JUNNYOR, W.S., MELO, G.B. Least limiting water range in assessing compaction in a brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciências do Solo** v. 38, p. 432–443, 2014. DOI:org/10.1590/S0100-06832014000200008.

GREENWOOD, K.L., MCKENZIE, B.M., Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. **Australian Journal Express Agricola**, v. 42, p. 1231–1250, 2001. DOI: org/10.1071/EA00102.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S., SEVERIANO, E.C., SILVA, A.G., GONÇALVES, W.G., ANDRADE, R., MARTINS, B.R.R., CUSTÓDIO, G.D., Sweet sorghum performance affected by soil compaction and snowing time as a second crop in the brazilian cerrado**. Revista Brasileira de Ciências Solo**, v.39, p.1744–1754, 2015. DOI: org/10.1590/01000683rbcs20150121.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S.; DE MARIA, I.C., ARAUJO-JUNIOR, LIMA, C.C, VITTI, A.C., FIGUEIREDO, G.C., DECHEN, S.C.F., Soil compaction in the traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Scientia Agricola** v.76, p.509–517, 2019. DOI:org/10.1590/1678-992X-2018-0052

HOTZ, V.; COUTO, R.F.; OLIVEIRA, D.G.; REIS, E.F. Deposição de calda de pulverização e produtividade da soja cultivada em diferentes arranjos espaciais. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 44, n. 8, p. 1371-1376, 2014. DOI: org/10.1590/0103-8478cr20130783

RABOT, E., WIESMEIER, M., SCHLÜTER, S., VOGEL, H.-J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v.314, p.122–137, 2018. DOI: org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009.

RADA, N., 2013. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v.38, p.146–155. DOI: org/10.1016/j.foodpol.2012.11.002.

ROSSETTI, K.V., CENTURION, J.F., 2017. Compactação em Latossolos e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Agroambiente** on-line, v.11, p.181–190. DOI: org/10.1590/S0100-06832010000300009

SECCO, D.; REINERT, D. J; REICHERT, J.M; SILVA, V. R. Soil Science, physical attributes and grain yield of wheat, soybean and corn in two compacted and scarified Oxisols Cienc. **Rural**. v. 39, p.1, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009000100010.

SEVERIANO E.C, OLIVEIRA G.C, DIAS JÚNIOR M.S, COSTA K.A.P, SILVA F.G., FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: I – Relationships between soil 24 physical properties and Least Limiting Water Range. **Revista Brasileira Ciências do Solo.** v.35, p.773–782. 2011. DOI: org/10.1590/S0100-06832011000300013.

SEVERIANO, E.C, OLIVEIRA, G.C., DIAS JUNIOR, M.S., CURI, N., COSTA, K.A.P., CARDUCCI, C.E., Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**. v.51, p.193–202, 2013. DOI: org/10.1071/SR12366.

SILVA, B.M., OLIVEIRA, G.C., SERAFIM, M.E., SILVA, E.A., FERREIRA, M.M., NORTON, L.D., CURI, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil Tillage Research**. 154, 103–113. DOI:org/10.1016/j.still.2015.06.013.

SILVA, B.M., OLIVEIRA, G.C., SERAFIM, M.E., SILVA, E.A., GUIMARÃES, P.T., MELO, L.B.B., NORTON, L.D., CURI, N., 2019. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potencial, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil Tillage Research**. v. 189, p. 36–43. DOI org/10.1016/j.still.2018.12.016.

SILVA, J. F. G, LINHARES, A. J. S. L., GONÇALVES, W. G, COSTA, K. A. P, TORMENA, C. A, SILVA, B. M, OLIVEIRA, G. C, and SEVERIANO, E. C. Are the yield of sunflower and Paiaguas

palisa degrass biomass influenced by soil physical quality? **Soil& Tillage Research**. v.208, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104873.

SILVA, L.F.S., MARINHO, R.S.B., MATSURA, E.E. Intervalo hídrico ótimo para avaliação de sistemas de produção e rendimento do feijão. **Irriga**. v.22, p.383–399, 2017. DOI: org/10.15809/irriga.2017v22n2p383-399.

STEFANOSKI, D.C., FIGUEIREDO, C.C., SANTOS, G.G., MARCHÃO, R.L., 2016. Selecting soil quality indicators for differen soil management systems in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 51, p.1643–1651. DOI:org/10.1590/S0100-204X2016000900064.

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 Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013. DOI:.org/10.1590/S1415-43662013001200008

TORINO, A. B; NASCIMENTO JUNIOR, L. F; BRITO, M. F; LIMA, J. D. P; GONCALVES, W. G; COSTA, K. A. P; SEVERIANO, E. C. Agronomic performance of maize and Brachiaria grasses cultivated at monocropping and intercropping in a compacted Latosol. **Australian Journal of Crop Science**. v.14, 1533-1540, 2020. DOI: 10.21475/ajcs.20.14.09.p2773.

TORMENA, C.A., ARAÚJO, M.A., FIDALSKI J., COSTA, J.M., Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférrico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira Ciências do Solo**. v. 31, p. 211–219, 2007. DOI: org/10.1590/S0100-06832007000200003.

TORMENA, C.A., SILVA, A.P., LIBARDI P.L., Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Braseira Ciências do Solo**. v. 22, p. 573–581, 1998. DOI: org/10.1590/S0100-06831998000400002.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. JUNIOR ROSSI, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 32, p. 33-42, 2008. DOI: org/10.1590/S0100-06832008000100004

VEZZANI, F.M., ANDERSON, C., MEENKEN, E., GILLESPIE, R., PETERSON, M., BEARE, M.H. The importance of plants to development and maintenance of soil structure, microbial communities and ecosystem functions. **Soil Tillage Res**. v. 175, p. 139–149, 2018. DOI:.org/10.1016/j.still.2017.09.002.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G.B.; MACEDO, M.C.M.; MARCHÃO, R.L.; GUIMARAES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. Sistema de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2011. DOI: org/10.1590/S0100-204X2011001000003

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a acurácia de indicadores de qualidade física do solo na avaliação das alterações estruturais do solo em sistemas integrados de produção agropecuária.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o potencial do capim-Paiaguás para soltura biológica do solo;
-Avaliar a eficácia de sistemas integrados de produção agrícola no desempenho agronômico de plantas de soja em relação a sistemas simples de produção de grãos;
- Modelar o IHO considerando as resistências mecânicas específicas dos sistemas de manejo adotados (grãos na monocultura, consórcio de grãos e pastagem na monocultura).
- Avaliar a eficácia e interação de 21 atributos físicos do solo que mensuram a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, submetido a sistemas de preparo e de manejo com 26 anos de duração;
- Testar se o emprego de estratificação da amostragem em diferentes camadas detecta adequadamente as alterações estruturais do solo em sistemas integrados de produção e;
- Avaliar os efeitos diretos e indiretos da compactação do solo.

3 CAPÍTULO I

Crop-livestock integration systems mitigate soil compaction and increase soybean yield

(Artigo nas normas da Revista Acta Scientiarum)

Crop-livestock integration improves soil physical quality

Jordaanny Lima, José Fausto Guimarães Silva, Adalto Jose de Souza Linhares, Katia Aparecida de Pinho Costa, Katia Aparecida de Pinho Costa, Camila Jorge Bernabé Ferreira , Eduardo da Costa Severiano (Autor),

Jordaanny Danyelly Pereira Lima[a], OrcID: https://orcid.org/0000-0003-0083-3304, José Fausto Guimarães Silva[a], OrcID: https://orcid.org/0000-0002-7196-4216, Adalto Jose de Souza Linhares[b], OrcID: https://orcid.org/0000-0002-2533-5427, Katia Aparecida de Pinho Costa[a], OrcID: https://orcid.org/0000-0002-9555-5089, Camila Jorge Bernabé Ferreira[a], OrcID: https://orcid.org/0000-0001-5006-9661, Eduardo da Costa Severiano[a]*, OrcID: https://orcid.org/0000-0002-6408-5061

[a] *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde. Rod. Sul Goiana, Km 01, Caixa Postal 66, 75901-970, Rio Verde, Goiás, Brasil*
[b] *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Ceres. Rod. GO-154, Km 03, Caixa Postal 51, 76.300-000, Ceres, Goiás, Brasil*
[c] *Universidade de Rio Verde. Fazenda Fontes do Saber, 75.901-970, Rio Verde, Goiás, Brasil.*
** Corresponding author: eduardo.severiano@ifgoiano.edu.br*

SUMMARY The use of integrated agricultural production systems has been expanded due to the multiple functions they perform. Although soil structural studies have elucidated the relationship of these systems with plant development, adjustments are needed to incorporate the diversity of management systems employed. Thus, the hypothesis of this study was that integrated cropping systems mitigate soil structural degradation and increase the agronomic performance of crops. The objectives of this study were to evaluate the biological soil loosening potential containing paiaguás grass and the effectiveness of integrated systems in promoting the agronomic performance of soybean plants and to model the least limiting water range (LLWR) considering the adopted management regimes. An experiment was performed based on a randomized block and split-plot design. In the plots, the traffic intensity (0, 2, 10 and 30 passes of an agricultural tractor. In the subplots, soybean cultivation was performed under the three management systems (simple: monoculture grains; integrated: intercropping between grass and grains; and pasture in monoculture). The following soil physical quality indicators were determined: bulk density (Bd) and LLWR; these indicators are related to phenological development attributes and soybean productivity. The integrated agricultural production systems promoted biological soil loosening and improved soybean yield. The use of Paiaguás grass in monoculture enhanced edaphic benefits and enabled greater grain production compared to grain monocropping. The least limiting water range was an efficient parameter for modelling the physical behaviour of the soil, and the application of the LLWR was improved by considering penetration resistance reference values specific to each management system. Our

results highlight the soundness of using the LLWR in evaluating the response of soybean to physical changes in soil due to compaction, and the reference values for penetration resistance contribute to greater accuracy in the LLWR and in the physical diagnosis of soil properties.

Key words: *Glycine max*; *Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás; least limiting water range; biological soil loosening; sustainability.

3.1 INTRODUCTION

Agricultural production has served as a major form of socioeconomic development in Brazil and the basis for international relations, contributing to trade and providing opportunities for the development of the country. Agricultural production is responsible for supplying food markets and contributing to global food security due to the technological revolution that has occurred in recent decades. Among cultivated species, soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] is the main summer crop, and Brazil is the second largest producer of soybean in the world, with a 154.6 million ton harvest in the 2022/2023 season (CONAB, 2023), which was mainly aimed at export.

However, increased agricultural development was based on the use of inputs (products) that initially brought about increases in production but more recently generated obstacles to productivity and resulted in environmental degradation. This is because soil compaction has widely occurred in production fields due to the use of mechanized agricultural equipment in all stages of the production process (Peixoto et al., 2019; Torino et al., 2020). Compaction is characterized by a compression of the soil due to the application of pressure (machinery and animals) and is the greatest agro-environmental limitation worldwide (Keller, Sandin, Colombi, & Horn, 2019), particularly in the Brazilian Cerrado, where the soils are most susceptible to soil compaction (Severiano et al. 2013).

However, management systems (processes) have been proposed to mitigate the effects of damage from machinery. Crop and livestock integration (CLI), for example, can enhance soil physical quality compared to simple cropping systems (Lemaire, Gastal, Franzluebbers, Carvalho, & Dedieu, 2014). In these systems, forage plants are included to keep the soil permanently covered with plants in all seasons of the year and might provide opportunities for grazing. Therefore, for these systems to succeed, it is necessary to include plants with the potential for soil structural improvement (Calonego, Raphael, Rigon, Oliveira Neto, & Rosolem, 2017; Silva et al., 2019), and in this context, Flávio Neto et al. (2015) highlighted the cultivation of *Brachiaria brizantha* due to its aggressive root action in breaking compacted

layers, which has several benefits for subsequent crops (Braida, Reichert, Veiga, & Reinert, 2006; Andrade, Segui, Carlesso, Trois, & Knies, 2011; Chioderoli et al., 2012; Silva et al., 2021; Muniz et al., 2021).

Additionally, the use of paiaguás grass (*Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás) is highly recommended in integrated agricultural production systems (Guarnieri et al., 2019; Silva et al., 2021) due to its potential to biological soil loosening, and understanding its effect is fundamental for adequate management, given its suitability for ILP, particularly its potential to mitigate damage from land use.

The least limiting water range (LLWR) has been widely adopted in characterizing the physical environment for plant root growth. Contemplates the soil water content in which matric potential, oxygen and mechanical resistance are not limiting for plant growth (Silva, Kay, & Perfect, 1994; Li et al., 2020; Oliveira et al., 2019; Silva et al., 2021; Moura et al., 2021). When limits are defined, it is possible to evaluate situations in which the crop is subject to water deficit or anoxia, as well as high mechanical resistance (Oliveira et al., 2019; Li et al., 2020). However, it is necessary to refine this indicator, considering the specificities of crops (Torino et al., 2020; Silva et al., 2021) or even soil management regimes (Moraes, Debiasi, Carlesso, Franchini, & Silva, 2014; Ferreira, Tormena, Severiano, Zotarelli, & Betioli Junior, 2020).

Therefore, the hypothesis of our study was that integrated systems would mitigate soil structural degradation and increase the agronomic performance of crops. The objectives were I) to evaluate the potential of paiaguás grass to biological soil loosening, II) to evaluate the effectiveness of integrated agricultural production systems on the agronomic performance of soybean plants relative to simple grain production systems, and III) to model the LLWR considering the specific mechanical resistances of the adopted management systems (grains in monoculture, intercropping of grains, and pasture in monoculture).

3.2 MATERIALS AND METHODS

Characterization of the site and soil studied

The field experiment was carried out at the experimental farm of the Instituto Federal Goiano (IF Goiano), municipality of Rio Verde, Goiás, Brazil (17°48'34.25”S; 50°54'05.36”W; and 731 m altitude; Figure 1). The Brazilian Soil Classification System (Santos et al., 2018) classifies it as a Latossolo Vermelho Acriférrico típico of clayey texture or Typic Haplustox (USDA, 2022). The southwestern region of the state of Goiás, where the experimental area is located, is an important agricultural region in Brazil due to its flat topography and because it is

covered by the oldest soils in the world. Additional information on the rock geology, soil mineralogy and main systems and on the management of this soil was provided by Severiano et al. (2013).

The region's climate is Megathermal or Humid Tropical (Aw), Tropical Savannah subtype, with dry winters and rainy summers. The average annual temperature is 25 °C, and the average annual rainfall is approximately 1600 mm, with the maximum precipitation occurring in January and the lowest precipitation occurring in June, July and August (< 50 mm month^{-1}). Summer weather occurs in the middle of the rainy season; it normally lasts 10 to 15 days with no rain and may last for more than 30 days.

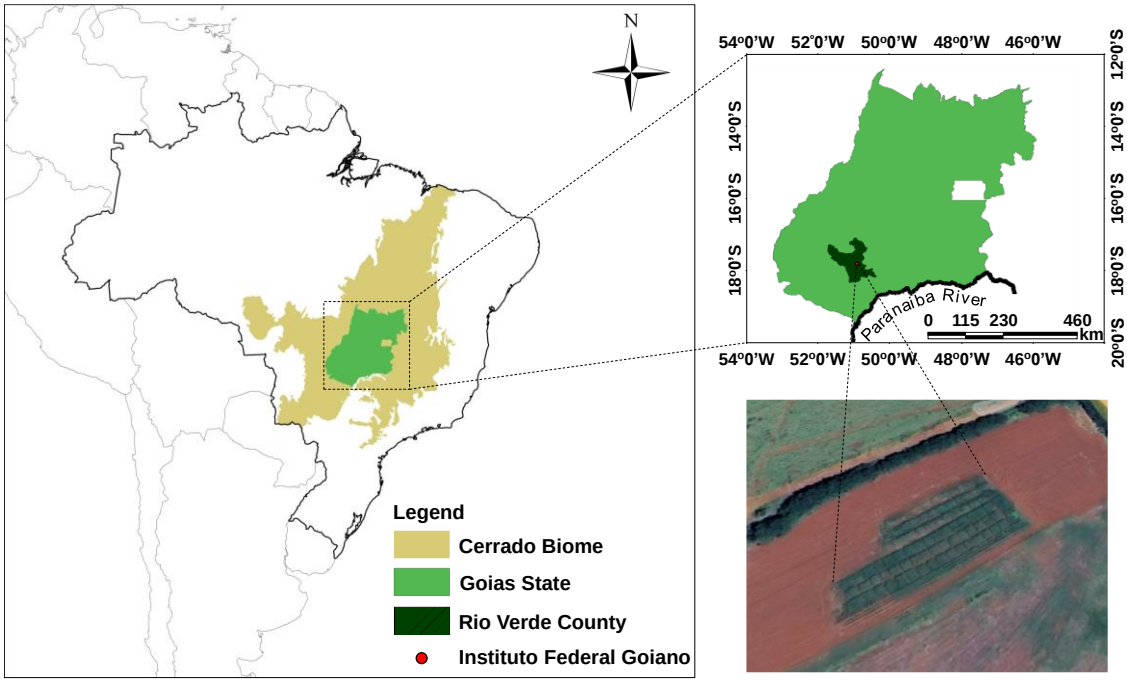

Figure 1 - Location of the experimental area in Rio Verde, Goiás, Brazil, Cerrado Biome.

Field experiment description

The experiment was performed during the 2014/2015 harvest in an area that was converted to a production field in 1990. Initially, the soil use history was eliminated by carrying out two cross-subsoiling operations at a depth of 0.45 m and incorporating 1.5 Mg of limestone (relative capacity of total neutralization = 80%, CaO = 36% and MgO: 12%) by harrowing with 28-inch disks and a levelling tool at 0.20 and 0.10 m depth, respectively. The necessary fertilization was carried out according to Sousa & Lobato (2004) and was adjusted for the soybean crop according to soil analysis (Table 1). The soil analytical procedures were based on Teixeira, Donagemma, Fontana, & Teixeira, (2017).

The experiment was conducted in accordance with a randomized block design and in accordance with a split-plot design with four replicates. In the plots, which were 12 m in length

and 6 m in width, four levels of compaction were evaluated through passes of an agricultural tractor with a mass of 4.5 Mg and a set of wheels made up of front and rear diagonal tires with inflation pressures of 95 and 165 kPa, respectively. Four traffic intensities were applied: T0: no additional traffic; T2: two passes; T10: ten passes; and T30: thirty passes of the tractor in the same place, covering the entire soil surface of the plot. The soil water content was close to field capacity (0.33±0.01 dm^3 dm^{-3}), a condition in which the soil is highly susceptible to compaction (Severiano et al., 2013; Silva et al., 2021).

In the subplots, consisting of 13 planting rows spaced 0.50 m apart and 4.0 m long, soybean cultivation was performed in the summer of 2015 after the harvest of sunflower (*Helianthus annuus* L.) (selected treatment of grains in monoculture) and a paiaguás grass (*Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás) (pasture in monoculture). Additionally, the two species were intercropped; the grass was implanted during the second harvest and remained throughout the entire 2014 off-season. The agronomic performance of crops was described by Silva et al. (2021).

Tabela 1. Physical and chemical characterization of the Latossolo Vermelho Acriférrico típico from the Brazilian Cerrado during soybean sowing, 2014/2015 harvest.

		Texture[2]			Oxides[3]			Soil chemical attributes								
Layer	Pd[1]	Sand (2.00-0.05 mm)	silt (0.05-0.002 mm)	Clay (< 0.002 mm)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ca	Mg	Al	H+Al	P	K	V[4]	OM[5]	pH
(m)	(kg dm^{-3})	---------- (g kg^{-1}) ----------						----- cmolc dm^{-3} -----				mg dm^{-3}		%	g kg^{-1}	
0-0.20	2.80	350	200	450	--	--	--	2.5	1.8	0.0	3.3	1.9	65	58	43	5.5
0.20-0.40	2.82	382	150	468	42	186	238	--	--	--	--	--	--	--	--	--

[1] Pd: particle density determined by the volumetric flask method. [2] Determined by the pipette method. [3] Determine via digestion with H_2SO_4 (standard method in Brazil) (Teixeira et al., 2017). [4] V: base saturation; [5] OM: organic matter. P: determined by the Mehlich extractor. pH was measured in a $CaCl_2$ solution.

Sampling and evaluation of the soybean crop

When the experiment was initiated, before cultivation (February 2014) and at soybean harvest (November 2014), after the plots were treated with glyphosate herbicide (4 l ha^{-1}), soil samples were collected from all compression subplots for physical, chemical and grading analysis (Table 1), and undisturbed soil samples were collected with the aid of a Uhland-type sampler (confined in volumetric cylinders of 0.064 m diameter, 0.05 m height and packed in plastic film (PVC), at three diagonal points in the plot (one point per subplot) and in three layers (0-0.05; 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m), for a total of 288 samples.

Mechanical implantation of the soybean crop was carried out on November 20, 2014, using a Massey Ferguson pivoted agricultural seeder (Model MF 500, regulated for a population

of 360,000 plants per hectare, recommended for the cultivar M 7110). This cultivar has the following parameters: INTACTA RR2 PRO®, a relative maturity of 6.8, indeterminate growth, resistance to lodging, an average height of 71 cm, productive stability and moderate susceptibility to the Javan root nematode. The seeds were inoculated with 1 kg of *Bradyrhizobium japonicum* as the inoculant for 50 kg of seeds. The inoculant was homogenized and graphited, and Cropstar® fungicide and Cruiser® insecticide, which are specific for seed treatment, were applied.

Fertilization was carried out according to the soil analysis (Table 1), and the integrated management of pests and diseases was carried out according to the following steps: 45 days after emergence (DAE), the fungicide trifloxystrobin + cyproconazole (300 mL ha^{-1}); 50 DAE, the full insecticide Engeo (200 mL ha^{-1}) for pest control (*Colaspis* sp., *Bemisia tabaci*, *Megascelis* sp., *Spodoptera albula*, *Euschistus heros*); and ant control with granulated bait (pyrazole chemical composition fipronil 0.01%) throughout the crop cycle.

To determine the soybean yield, 112 days after sowing, plants were harvested in an area of 5 m^2 in the centre of the plot, and 10 of these were separated for agronomic evaluation of the crop: (i) plant height; (ii) number of pods; and (iii) number of scars with and without pods. The plants were subsequently threshed, and the grains were weighed. The results obtained from each subplot were subsequently transformed into weights of 1000 grains and yields (kg ha^{-1}) corrected to 13% moisture. During the experiment, rainfall and temperature were monitored in the field, and the results are shown in Figure 2.

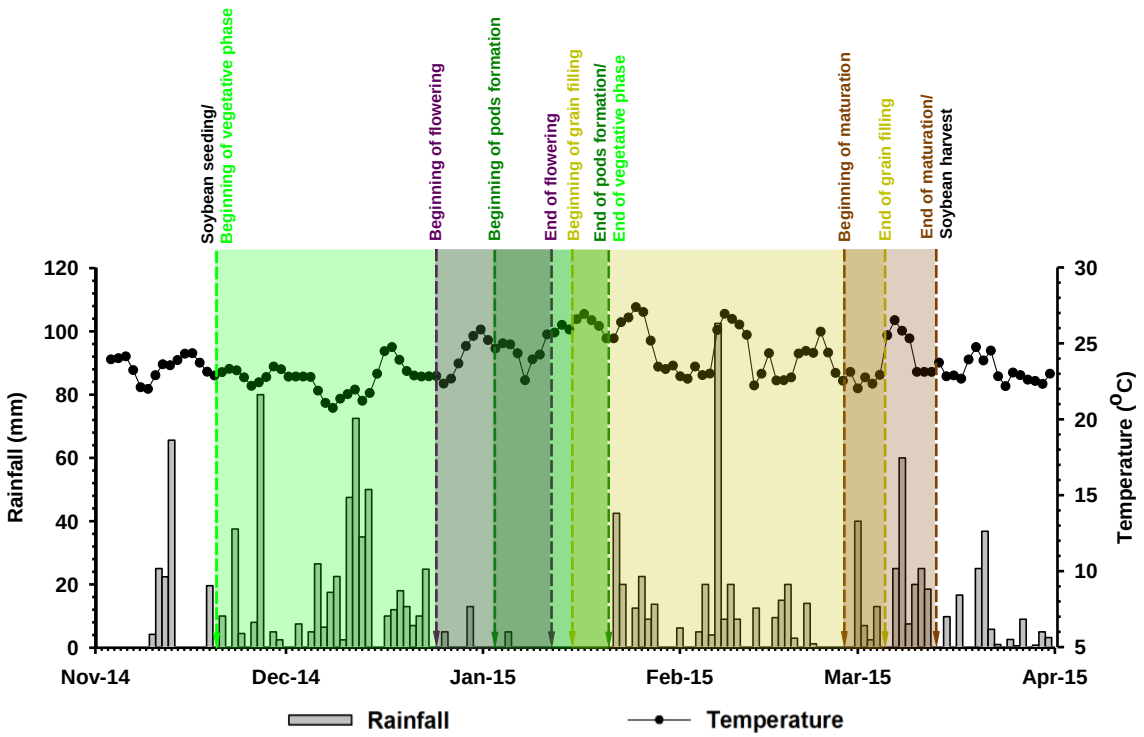

Figure 2 - Precipitation (mm) and average daily temperature (°C) during the soybean cycle, 2014/2015 harvest, in the municipality of Rio Verde, Goiás, Brazil.

Soil evaluation

The undisturbed samples were processed at the Laboratory of Soil Physics at IF Goiano, with excess soil removed from the edges of the cylinders. The surplus material was used to determine the permanent wilting point (matrix potential of -1.5 MPa) by subjecting the saturated soil to the Richards extractor apparatus (Teixeira et al., 2017). Afterwards, the samples were saturated by gradually raising the water level for 48 h and then subjected to a matrix potential of -0.006 MPa until hydraulic equilibrium was reach. At this potential, the retained water content was considered equivalent to the field capacity for this Latossolo, as suggested by Severiano et al. (2011) and Silva et al. (2021). Subsequently, the samples were air-dried to obtain water contents ranging from 0.03 to 0.36 dm^3 dm^{-3} in the samples, during which the penetration resistance (PR) was determined using a bench penetrometer with a displacement speed of 10 mm min^{-1} and automatic data logging. Afterwards, the soils were dried in an oven at 105 °C for 48 hours to determine the soil bulk density (Bd). The total porosity (TP) was determined by Equation 1, with Pd being the particle (Table 1).

$$TP = [1 - (Bd/Pd)] \qquad \text{Equation 1}$$

The adjustment of the water retention data according to Bd resulted in Equation 2, considering the soil water retention curve at field capacity (FC):

$$\theta_{FC} = \text{-}0{,}7842 + 2{,}1982\text{Bd} - 1{,}1565Bd^2; \quad R^2 = 0{,}83 ** \qquad \text{Equation 2}$$

The soil penetration resistance curve (SPRC) was obtained by adjusting the PR values for the water content (θ) and the Bd using the model proposed by Busscher (1990), with coefficients described in Equation 3:

$$PR = 0{,}036\theta^{-1{,}648}Bd^{7{,}341}; \quad R^2 = 0{,}75 ** \qquad \text{Equation 3}$$

The least limiting water range (LLWR) was calculated according to procedures described in Silva et al. (1994), considering as the upper limit (LS) the lowest value between the water content in the field capacity (θ_{FC} – Eq. 2) or the water content in the restrictive aeration porosity (θ_{AP}) (0.10 dm^3 dm^{-3}), calculated using Equation 4.

$$\theta_{AP} = PT - 0.1 \qquad \text{Equation 4}$$

The lowest limit (LI) is the highest value between the water content retained at the permanent wilting point (θ_{PWP}), obtained from gravimetric to volumetric moisture correction ($\theta_{PWP} = U_{1,5MPa} * Bd$), and/or the water content corresponding to the soil penetration resistance, initially with a value of 2.5 MPa (θ_{PR}).

The value of Bd at which the first reduction in available water occurred between the FC and PWP was considered the structural alert Bd (Bd_{alert}). A Bd for which the LLWR = 0 was considered critical and highly restrictive to plant development, regardless of the soil water content (Silva et al., 1994).

Statistical analyses

To evaluate the potential for biological soil loosening as a result of the cultivation of paiaguás grass, comparisons were made between linearized regressions ($y = a + bX^c$, where $y = Bd$ and $x = passes^c$), according to Snedecor & Cochran (1989), of the impact of agricultural tractor traffic (bulk density as a function of the number of passes) before and after the implementation of the management systems. This statistical procedure is used to analyse the homogeneity of the data (F), the significance of the intercepts (a), the angular coefficients and the linearized regression (b). When there is homogeneity between the regressions and when the coefficients are not significant, they are grouped, and a new equation is generated considering all the previous results.

All the statistical analyses were performed using SAS software (SAS, 2002). The results of agronomic performance and soybean yield were subjected to analysis of variance using the PROC GLM routine and regression adjustment (PROC REG) when significance was demonstrated. In addition, the crop yield (yield/maximum yield) was normalized for each treatment, and the results were plotted in a contour graph as a function of PR and θ. The threshold PR in the θ_{FC} was defined considering 90% of the yield, after which the LLWR was estimated again for the soybean crop in the production system.

3.4 RESULTS

Table 2 compares the curves for soil compaction resulting from the use of agricultural equipment during soybean cultivation under 3 management systems (grains in monoculture; intercropping and pasture in monoculture) and 4 levels of soil compaction (T0, T2, T10 and T30). According to statistical analysis, we grouped areas with the same structural conditions before the implementation of the systems and under grain cultivation in monoculture (after cultivation) > intercropping system > pasture in monoculture (Table 2) during the desiccation of Paiaguás grass.

Tabela 2. Comparison between the linearized regressions of curves of soil compression as a result of agricultural equipment traffic before and after the implementation of monoculture and intercropping management systems in a Latossolo Vermelho Acriférrico típico.
(1).

System	F	F Linear coefficient, log a	Slope coefficient, b	Decision
Grains in monoculture x intercropping	H	**	we	do not group
Grains in monoculture x pasture in monoculture	H	**	**	do not group
Intercropped x pasture in monoculture	H	**	**	do not group
Compression before x grains in monoculture	H	we	we	Group
Compression before; grains in monoculture x consortium	H	**	we	do not group
Compression before; grains in monoculture x pasture in monoculture	H	**	**	do not group

(1)Analysis performed according to Snedecor & Cochran (1989)NH: Nonhomogeneous; H: Homogeneous; ns: not significant; *: significant at 5%; **: significant at 1%.

The use of integrated agricultural production systems promoted increases in Bd in previously tilled soil (T0) and reductions in all traffic intensities, with Bd being more effective

with pasturing in monoculture (Figure 3). This was verified by comparing the linearized equations (Table 2) and confirmed by the high coefficient of determination of the regression adjustments (R^2; $p<0.01$).

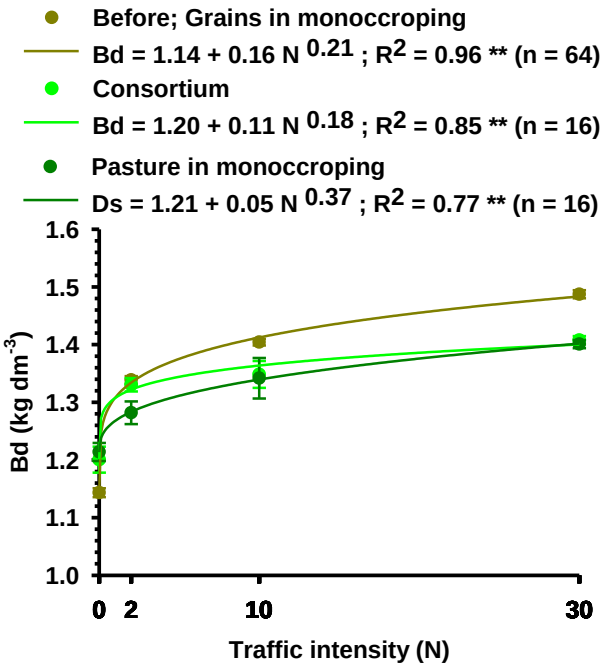

Figure 3 - Impact of agricultural tractor traffic [Bulk density (kg dm-3) as a function of the number of passes (N)] before and after the implementation of management systems in monoculture (grain and pasture) and intercropped in a Latossolo Vermelho Acriférrico

The relationships between water content and bulk density (Bd), considering the critical limits of the LLWR, are shown in Figure 4. The upper limit of the LLWR was represented by the θ_{FC} in almost the entire range analysed, which was replaced by the θ_{AP} from Bd 1.46 kg dm^{-3} (Figure 4A). A change in lower limit contents occurred at 1.28 kg dm^{-3} from θ_{PWP} to θ_{PR} and the LLWR became null at 1.44 kg dm^{-3} (Figure 4B), which is considered the critical value.

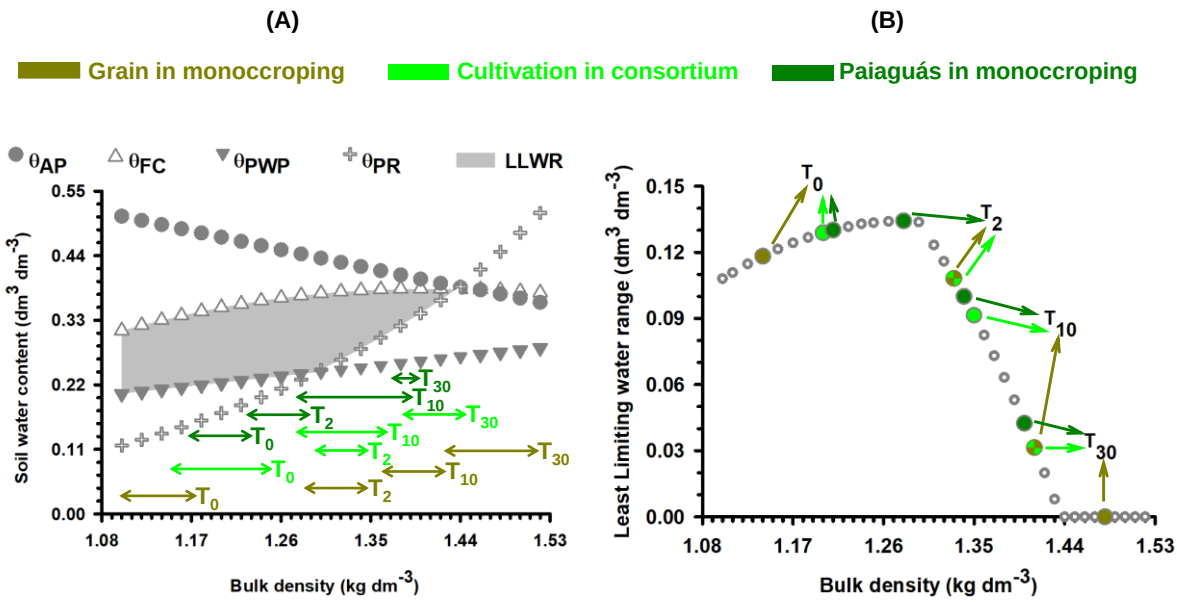

Figure 4 - Variation in soil water content (θ) as a function of increasing bulk density (Bd) at critical field capacity (θ_{FC}: ψ_m = -0.006 MPa), permanent wilting point (θ_{PWP}: ψ_m = -1.5 MPa), aeration porosity of 0.10 dm^3 dm^{-3} (θ_{AP}) and penetration resistance of 2.5 MPa (θ_{PR}) limits (A) and variation in the least limiting water range (LLWR) with increasing Bd (B) in the 0-0.15 m layer of the Latossolo Vermelho Acriférrico típico of the Brazilian Cerrado due to agricultural tractor traffic in monoculture systems (grains and pasture) and intercropping systems. The hatched area represents the LLWR;ψ_m: matrix potential; Bd_{alert}: bulk density at which the first reduction in available water occurs; Bd_c: bulk density at which the LLWR = 0; T0 = 0, T2 = 2, T10 = 10, and T30 = 30 passes over the same area of an agricultural tractor weighing 4.5 Mg.

Again, the effect of integrated agricultural production systems in mitigating soil compaction could be observed. There was an increase in the LLWR when Paiaguás grass was cultivated in the off-season in the T0 (main limitation: low water retention), T10 and T30 treatment (strongly affected by high PR). The highest value for the LLWR was observed in the T2 monoculture (Figure 4B).

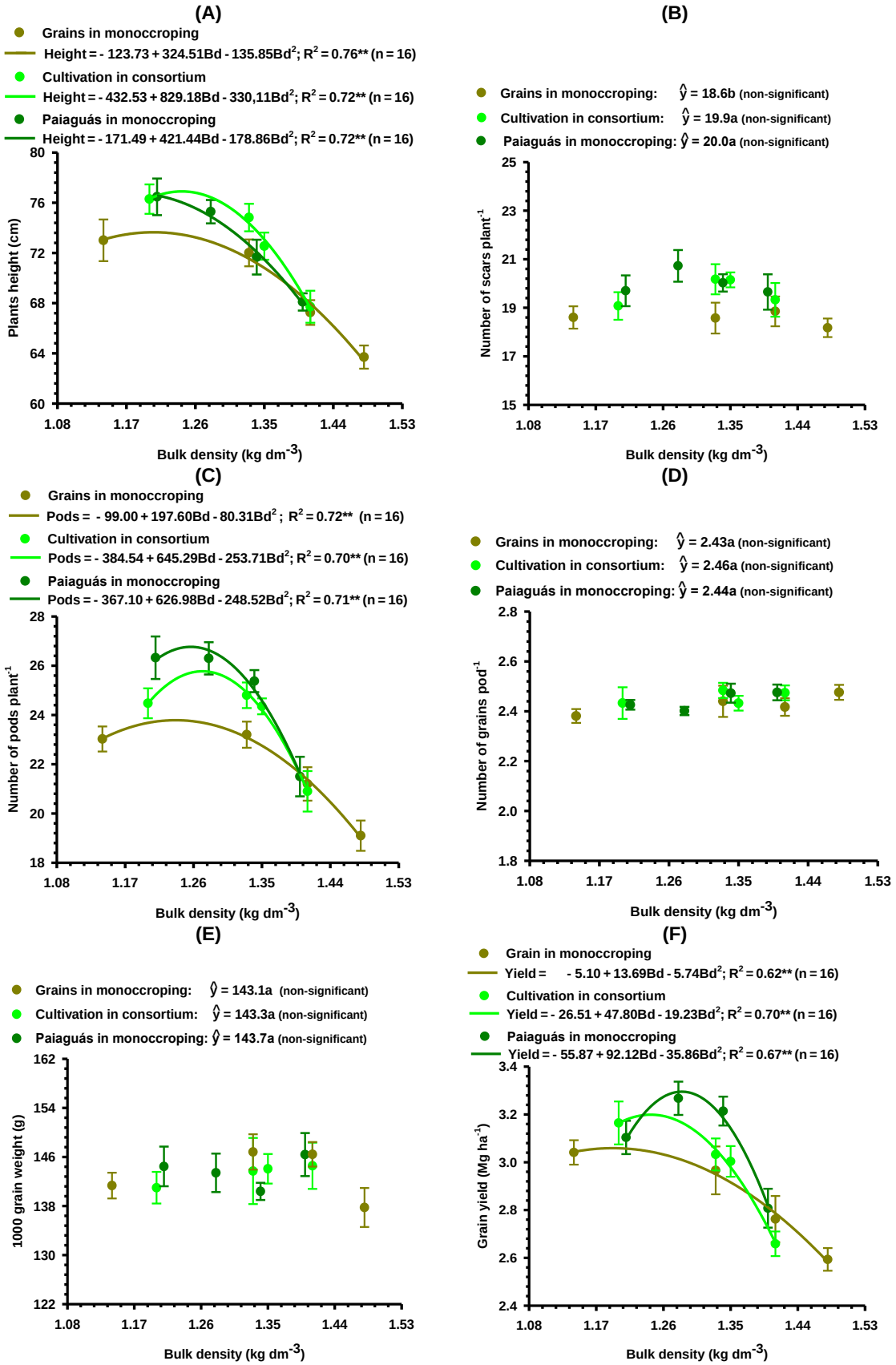

Figure 5 - Phenological development and grain yield of soybean plants as a function of bulk density in monoculture (grain and pasture) and intercropped management systems in a Latossolo Vermelho Acriférrico típico. A: Plant height; B: number of scars per plant; C: number of pods per plant; D: number of grains per pod; E: weight of 1000 grains and; F: grain yield per hectare

Plant height (Figure 5A), number of pods per plant (5C) and grain yield (5F) were affected by the two factors evaluated, with superior performance for the intercropped system and pasture in monoculture. The maximum yield was 3.06 Mg ha^{-1} at a Bd of 1.19 kg dm^{-3} in the monoculture grain system, while the yield in the intercropping system reached 3.19 Mg ha^{-1} in 1.24 kg dm^{-3}; for the monoculture pasture system, the yield was 3.29 Mg ha^{-1} in 1.28 kg dm^{-3}.

For the number of nodes per plant (5B), only the crop-livestock integration systems had an effect; again, there was superior performance compared to grain monoculture, while for the number of grains per pod (5D) and weight of 1000 grains (5E), no differences were found.

Figure 6 suggests that integrated management mitigated soil compaction and promoted yield performance of soybean, and the causes are presented in Figures 3, 4 and 5. The relative yield of soybean is exponentially related to the variation in PR as a function of θ. When the soil structure is preserved, even when the water content in the soil is close to the permanent wilting point, it is possible to obtain the maximum yield for PR values > 2.5 MPa. However, with increasing soil compaction, the influence of mechanical resistance increases with an increase in the amplitude of the evaluated moisture.

The analysis of relative soybean yields as a function of soil compaction and management systems clearly differentiates the edaphic environment of agricultural production. When the yield was greater than 90%, the PR was 1.6 MPa for grains in monoculture (Figure 6A), 2.0 MPa for intercropping (Figure 6B) and 2.4 MPa when only Paiaguás grass was cultivated throughout the off-season (Figure 6C) based on water content at field capacity.

Considering the biological response to these PR values, the LLWR was recalculated (Figure 7) rather than using the preestablished value of RR = 2.5 MPa (Figure 4). The new LLWRs increased in the following order: LLWRgrains > LLWRintercropped > LLWRpasture, with Bd_{alert} values of 1.19, 1.24 and 1.28 (Figure 7A) and Bd_c values of 1.36, 1.40 and 1.44 kg dm^{-3}, respectively (Figure 7B).

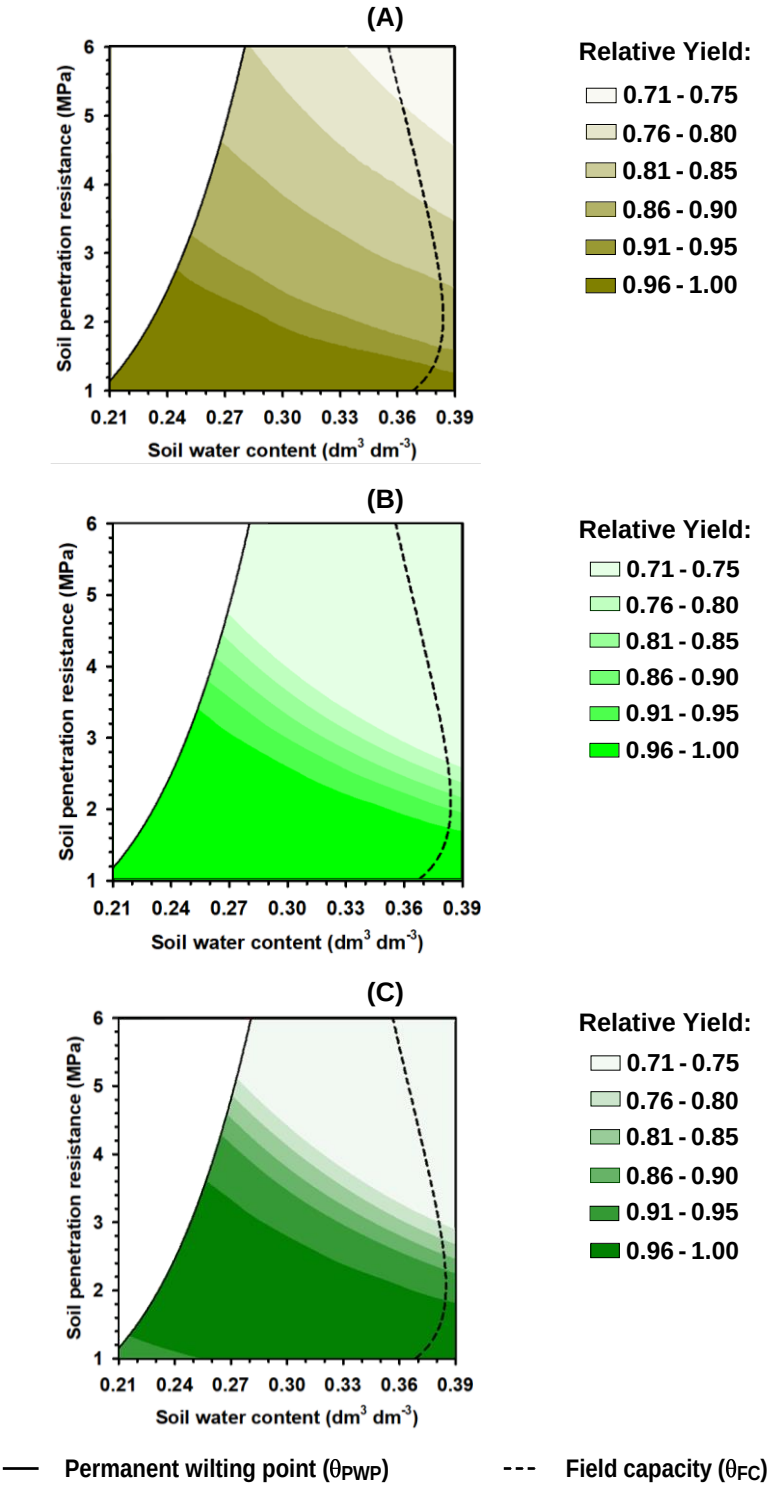

Figure 6 - Variation in soil penetration resistance as a function of soil water content and relative yield of soybean plants in a grain management system under monoculture (A), integrated agriculture and livestock (B) and pasture in monoculture (C) in a Latossolo Vermelho Acriférrico típico in the Brazilian Cerrado.

It is worth noting that the Bd_{alert} values (Figure 7) are consistent with the points of maximum soybean grain yield (Figure 5) and demonstrate an improvement in the accuracy of the LLWR based on the critical values of the PR.

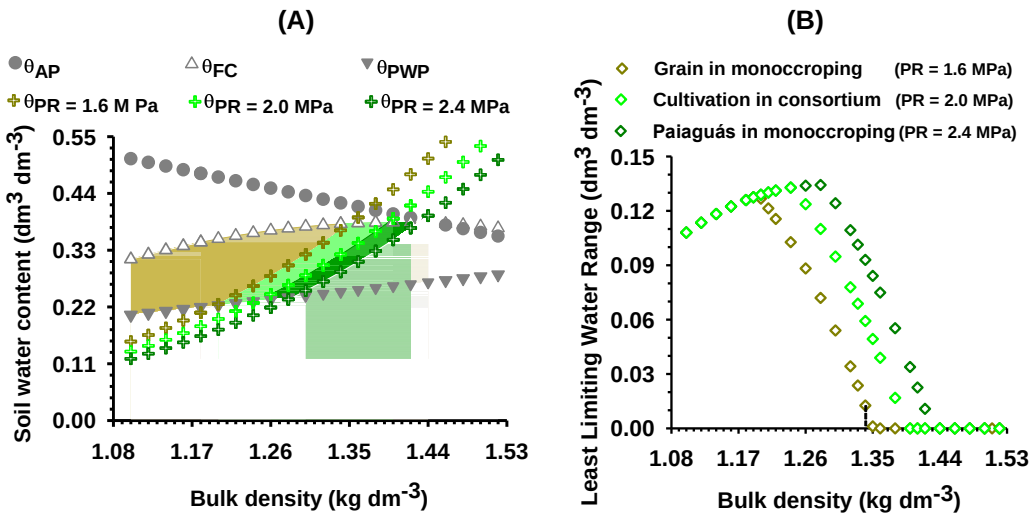

Figure 7 - Variation in soil water content (θ) as a function of increasing bulk density (Bd) at critical field capacity (θ_{FC}: ψ_m = 0.006 MPa), permanent wilting point (θ_{PWP}:ψ_m:-1.5 MPa), aeration porosity of 0.10 dm^3 dm^{-3} (θ_{AP}) and penetration resistance (PR) of 1.6, 2.0 and 2.4 MPa (θ_{PR}) limits (A) and variation in the least limiting water range (LLWR) with increasing Bd (B) in the layer of 0-0.15 m of a Latossolo Vermelho Acriférrico típico of the Brazilian Cerrado due to agricultural tractor traffic in monoculture systems (grains and pasture) and intercropped systems. The hatched area represents the LLWR.

3.5 DISCUSSION

The effect of integrated management systems on soil physical properties

According to analysis by Snedecor & Cochran (1989) (Table 2), there was no difference in the soil compaction curves between a monoculture grain management system and an integrated management system, which demonstrated the limited effect of previously planted crops (in this case, sunflower in monoculture). The high susceptibility of the soil to compaction is clear, with a loss of yield capacity in more than 50% of achenes due to soil compaction and metabolic changes (Silva et al., 2021). However, the cultivation of Paiaguás grass pastures had effects, both in consortium and in monoculture; therefore, the models were adjusted separately (Figure 3). The physical properties of a soil can negatively impact the yield of successive crops (Derpsch et al., 2014; Buchi et al., 2017; Oliveira et al., 2019; Torino et al., 2020; Ferreira et al., 2023), particularly in the clayey soils of the Brazilian Cerrado (Severiano et al., 2011; Silva et al., 2015; Moura et al., 2021), where compaction is an unavoidable process [according to Severiano et al. (2013), worldwide, these soils are most susceptible to compaction].

The LLWR exhibited properties that are characteristic of soils in the Brazilian Cerrado (Severiano et al., 2011; Flávio Neto et al., 2015; Silva et al., 2021). In this study, poor aeration was not a problem, except under conditions of severe physical degradation, such as after BDc (Figure 4). The main limitations therefore occur due to low water retention under soil structural conditions that are close to the natural conditions and when the soils are compared with soils from other Brazilian

regions (Ferreira et al., 2020) or even those in temperate climates. This is due to the granular structure of Latossolos, in which structural pores (macropores) develop that, in turn, promote low capillarity, low water retention and, consequently, greater aeration (Severiano et al., 2013; Silva et al., 2022).

With increasing soil compaction, there was a significant increase in water availability (Figure 4B), which was beneficial for crops (Severiano et al., 2011; Silva et al., 2021). However, at high PR values, soil compaction is a serious physical problem, in agreement with the findings of Tormena, Karlen, Logsdon, & Cherubin (2017), and may harm plant development (Peixoto et al., 2019; Moura et al. 2021; Silva et al., 2021) and limit soybean yield (Ferreira et al., 2023), as well as the yield of other annual grain crops commonly used in rotation (Peixoto et al., 2019; Torino et al. 2020; Silva et al., 2021). High degrees of compaction limit root development (increase θ_{PR} and decrease LLWR), as compaction causes abiotic stress and leads to loss of crop yield (Keller et al., 2019).

Our results highlight the role of Brachiaria in soil structuring. With no traffic (T0), there was an increase in Bd of 5% and 6% in the intercropped and pasture in monoculture system relative to grains in monoculture (Figure 3), which increased the LLWR (Figure 4B). This may have occurred due to the formation of aggregates through adhesion between soil particles due to the cementing action of soil organic matter and root exudates which, in turn, stimulate soil microbial activity, inducing the formation of microbial byproducts that also stabilize soil aggregates; the mechanical action of roots can also bring soil particles together (Brandão & Silva, 2012; Borghi et al., 2013). It is worth noting that this plant has an extensive root system and is aggressive (Lima et al., 2023).
The Bd point that separates beneficial compaction ($LLWR_{max}$) from restrictive compaction was defined by Silva et al. (2021) as Bd_{alert}, with a value of 1.28 kg dm^{-3}. It corresponds to the condition under which θ_{PR} replaces θ_{PWP} as the lower limit of the LLWR (Figure 4). In addition, the effect of grass monoculture was best under moderate compaction (T2) conditions. This type of structural improvement has been reported by several authors (Brandão & Silva, 2012; Borghi et al., 2013; Crusciol et al., 2014; Flávio Neto et al., 2015; Calonego et al., 2017; Pariz et al., 2017; Silva et al., 2019; Moura et al., 2021).

The integrated agricultural production systems proved to be effective at mitigating soil compaction promoted by the most intense traffic condition evaluated (Figure 3). This process associated with forage plants was described by Flavio Neto et al. (2015) as biological soil loosening and was more intense with *B. brizantha* than with other grasses of the same genus (Silva et al. 2019). The use of paiaguás grass was effective; it promoted adequate forage production in the off-season for animal grazing and soil cover for no-till treatment, and the soil could tolerate nearly three times more compaction (measured by the authors as PR) compared to soils cultivated with annual grain crops (Silva et al., 2021). This practice also improved the edaphic environment for successive crops (Figure 4).

Therefore, Paiaguás grass contributed to an improvement in the root environment both in terms of soil restructuring (when the soil was freshly turned over) and biological soil loosening. The inclusion of this grass reduced Bd under high compaction conditions (Figure 3) and increased the LLWR by 68 and 74% at the site with 10 passes of the tractor and by 23 and 32% at the site with 30 passes, respectively, in the intercropped and monoculture systems. The lower performance of intercropped plants was due to interspecific competition during the initial establishment of the species, as noted by Silva et al. (2021) during the evaluation of the first crop of this experiment. Additionally, the full activity of the grass was limited; this in turn severely compromised sunflower production. Therefore, to use consortia, the structural conditions of the soil must be determined to enhance the ability of the system to repair the physical degradation of the soil and restore the productive potential of agricultural systems.

These results, although encouraging for agricultural planning, were less promising than those of Flávio Neto et al. (2015), who reported 54 to 88% physical recovery after the cultivation of *Brachiaria brizantha* grass in the off-season in a severely compacted soil. This discrepancy could to due to the following reasons: I - the paiaguás grass, here, was planted at the end of the rainy season, remained for seven months (in contrast to eleven months in the other work) and was exposed to lower soil water content at the time of establishment; and II - this is the first time that the biological loosening potential of this cultivar has been evaluated, and it may (or may not) have a lower performance in relation to other cultivars. Therefore, it was necessary to compare the grasses under the same experimental conditions to better support this finding.

Our results suggest that the aforementioned approach is justified, especially considering its effect under moderate degradation conditions (T10). The effects mainly involved improving soil water conditions, particularly under conditions of irregular rainfall. The agronomic performance of successive crops was improved by the grass since the soybean plants experienced a period of 22 consecutive days with no rain during the full flowering and pod formation stages (Figure 2).

Integrated systems, soil compaction and soybean agronomic performance

Among the soybean growth parameters (Figure 5), plant height reflects the edaphoclimatic conditions throughout the crop cycle, given the indeterminate growth of the variety. Soil compaction positively and negatively affected (quadratic polynomial adjustment) plant height, while integrated systems mitigated physical soil degradation by increasing the maximum point by up to 10% in relation to the system under monoculture (Figure 5A). The number of nodes, which was influenced only by the management system employed, showed up to 1.5 more axils per plant (Figure 5B) in the integrated systems, which is relevant because it is the point of insertion of the pods. Thus, an increase in the number of nodes (Figure 5C) of 13 and 20% was observed in the integrated systems, in addition to

an increase in Bd at the maximum point from 1.23 to 1.27 kg dm^{-3}. This occurred due to the direct and indirect effects of foraging.

In addition to biological soil loosening (Figure 4), the inclusion of pastures in agricultural systems has multiple functions, as described by several authors: 1) cattle production in pastures, 2) maintenance of dead biomass for the no-tillage system and 3) provision of environmental services, according to Silva et al. (2021); 4) reduction of thermal oscillation in the surface soil layer (Braida et al., 2006; Chioderoli et al., 2012); 5) nutrient cycling (Muniz et al., 2021); and 6) maintenance of soil moisture (Andrade et al., 2011; Flávio Neto et al., 2015). The production of dead biomass for soil cover was determined by Silva et al. (2021), who reported values of 5.5 and 3.8 Mg ha^{-1} for intercropped systems and monoculture pastures, respectively, which were considered satisfactory for providing the aforementioned benefits.

Adequate grain formation was determined by the number of grains per pod (although this is a genetically controlled characteristic) and by the weight of 1000 grains (not significant - Figures 5D and 5E) and coincide with the resumption of rain (Figure 2). Soybean yield losses with increasing soil compaction (Beutler, Centurion, Cruz, & Silva, 2006; Girardello et al. 2014; Moura et al., 2021; Botta et al. 2022; Ferreira et al. 2023). In this study, the yields were equivalents the Brazilian average for the crop and 5 and 8% greater, respectively, for the intercropping system and monoculture pasture, both for yield and Bd maximum (Figure 5F).

The quadratic relationship of the agronomic variables and, mainly, of grain yield reinforce the following findings: 1) Severiano et al. (2011) asserted that slight compaction in the Oxidic Latossolos of the Brazilian Cerrado is beneficial, given the high porosity of the soil under natural conditions (Severiano et al., 2013; Silva et al., 2022); they noted that compaction improves water retention and availability (as seen in Figure 4); 2) paiaguás grass improved the edaphic environment by conditioning the soil structure towards the maximum and ideal LLWR from a physical point of view (that is, with maximum water availability, adequate contact area between roots and soil, sufficient and continuous pore space for the movement of gases and water and without excessive mechanical resistance), both under recent turning (T0) or excessive compaction conditions (T10 and T30).

Thus, it is essential to discuss the relevance of adopting integrated agricultural production systems for mitigating agro-environmental damage and maintaining the yield capacity of soils, especially considering that soybean performance is affected by the interaction between soybean genotype and the environment. The water demand of crops in rainfed systems is intimately influenced by the water retention capacity of soils and rainfall. In the flowering/grain filling period, the evapotranspiration demand can reach values of 8 mm day^{-1} (Buchi et al., 2017), a critical condition in terms of the observed lack of rainfall (Figure 2) and a factor that cannot be controlled by farmers. Although the agronomic response of soybean plants is affected by phenotypic plasticity [adaptability

to management and environmental conditions, according to Balbinot Junior, Procopio, Neumaier, & Franchini (2016) and Carmo, Braz, Simon, Silva, & Rocha, 2018)], yield is reduced in some cases (Ferreira et al., 2020; Ferreira et al., 2023) but not in others (Secco, Reinert, Reichert, & Silva, 2009).

LLWR modelling based on the effects of soil management systems

LLWR represents an important advance in soil biophysics studies because it is the indicator that best correlates with plant growth (Tormena, Araújo, Fidalski, & Costa, 2007). However, it is necessary to refine it, particularly with respect to the reference values for limiting grades (Silva et al., 2015; Ferreira et al., 2020; Silva et al., 2021). The literature still lacks studies related to the biological responses of soybean plants to soil compaction, particularly in integrated agricultural production systems, and our results suggest different responses in soybean plants to soil compaction.

In addition to the increase in yield in the order of pasture in monoculture > intercropped system > grains in monoculture, there was also an increase in tolerance to compaction observed for Bd at the point of maximum yield in the same order (Figure 5F). In this context, an improvement in the LLWR can contribute to improved accuracy as an indicator of yield potential since its performance in the diagnosis of the structural condition of soil is improved (Silva et al., 1994; Reichert, Suzuki, Reinert, Horn, & Håkansson, 2009; Severiano et al., 2011; Flávio Neto et al., 2015; Tormena et al., 2017; Silva et al., 2019; Ferreira et al., 2020; Silva et al., 2021). Figure 6 demonstrates that the relative yield had an exponentially relationship to the variation in PR and θ in θ_{FC} and θ_{PWP}, as modelled by Eq. 3. According to Peixoto et al. (2019), high plant productivity potential exists even when a soil has high PR; thus, determination of the θ_{FC} condition is recommended to standardize the effects of θ since there are no restrictions regarding mechanical resistance (θ_{AP} not being limiting, as already discussed) under these conditions. Considering that the penetration resistance value equates to 90% yield, as suggested by Silva et al. (2021), at a PR of 1.6, 2.0 and 2.4 MPa, soybean plants in monoculture, intercropped system and monoculture pastures, exhibit different biological responses.

The strategy of using PR values that affect agronomic yield in integrated systems recognizes the edaphic environment of production in a differentiated way, consistent with the magnitude of the soil quality indicator studied. In previous studies, preestablished values were used that varied in most cases between 2.0 and 2.5 MPa (which here would represent an overestimation of the mechanical resistance of the simple system of grain cropping; Figure 6), as in the case of results from Silva et al. (1994), Reichert et al. (2009), Severiano et al. (2011), Flávio Neto et al. (2015), Tormena et al. (2017) and Silva et al. (2019). In addition, to improve the LLWR, Moraes et al. (2014) and Ferreira et al. (2020) considered a critical limit for soils under long-term no-tillage, with a PR value equivalent to 3.5 MPa (higher than our results). According to the authors, under these conditions, the soil has root biopores from previous crops that partially compensate for the state of soil compaction. Despite these

findings, the aforementioned studies did not involve dry spells during cultivation; thus, in the absence of water deficit, soybean plants develop even under high compaction conditions. Integrated agricultural production systems, therefore, mitigate climatic stresses associated with compacted soils.

Figure 7 demonstrates through the LLWR the growth environment in each management system, demonstrating that integration makes the system more resilient as it increases Bd_{alert} (1.19, 1.24 and 1.28 kg dm^{-3} for grains in monoculture, intercropped system and pastures in monoculture), the Bd_c (1.36, 1.40 and 1.44) and the entire range of the LLWR (θ_{AP} is not a problem for the studied soil). Our results provide guidance for the physical diagnosis of soil conditions and agronomic planning in terms of the management system to be adopted. By considering specific PR thresholds (the main factor reducing the LLWR), methodological advances can be made by describing the physical environment for the development of crops in succession (Figure 7B).

3.6 CONCLUSIONS

The integrated agricultural production systems reduced soil compaction and the effects of dry spells and contributed to the growth and yield of soybean. The use of Paiaguás grass in monoculture throughout the preceding off-season enhanced edaphic benefits, and soybean plants performed better by up to 10% compared to plants in a simple monocropping system. The least limiting water range proved to be efficient variable for modelling the physical behaviour of the soil, and the application of the LLWR was improved by considering specific penetration resistance reference values for each management system. These results underscore the soundness of the LLWR in assessing soybean response to soil physical changes due to soil compaction. The PR reference values contribute to greater accuracy in the LLWR and soil physical diagnoses. Research of this nature contributes to a better understanding of soil management systems and serves as the basis for sustainable agricultural production.

Acknowledgements

The authors thank the IF Goiano (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano) for supporting this research.

REFERENCES

Andrade, J. G., Segui, J. P., Carlesso, R., Trois, C., & Knies, A. E. (2011). Perdidas de água por evaporación en maíz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta. I. resultados experimentale. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 20(2) 29-36.

Balbinot Junior, A. A., Procopio, S. O., Neumaier, N., & Franchini, J. C. (2016). Semeadura cruzada, espaçamento entre fileiras e densidade de semeadura influenciando o crescimento e a produtividade de duas cultivares de soja. Revista de Ciências Agroveterinárias, (15)2. 83-93. DOI: 10.5965/223811711522016083

Beutler, A. N., Centurion, J. F., Cruz, M. A. P., & Silva, A. P. (2006). Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(5) 787-794. DOI: 10.1590/S0100-06832006000500004

Borghi, E., Crusciol, C. A. C., Nascente, A. S., Sousa, V. V., Martins, P. O., Mateus, G. P., & Costa, C. (2013). Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. *European Journal of Agronomy*, (51)130-139. DOI: 10.1016/j.eja.2013.08.006

Botta, G. F., Antille, D. L., Nardon, G. F., Rivero, D., Bienvenido, F., Contessotto, E. E. A., … Ressia, J.M. (2022). Zero and controlled traffic improved physical soil conditions and soybean yield under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, 215. 105235 DOI: 105235,10.1016/j.still.2021.105235

Braida, J. A., Reichert, J. M., Veiga, M., & Reinert, D. J. (2006). Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, (30)4, 605-614. DOI: 10.1590/S0100-06832006000400001

Brandão, E. D., & Silva, I. F. (2012). Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. *Ciência Rural*, v. 42(7), 1193-1199. DOI: 10.1590/S0103-84782012000700009.

Buchi, L., Wendling, M., Amosse, C., Jeangros, B., Sinaj, S., & Charles, R. (2017). Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil & Tillage Research*, (174)120-129. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.002

Busscher, W. J. (1990). Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, (33)2, 519-524. DOI: 10.13031/2013.31360.

Calonego, J. C., Raphael, J. P. A., Rigon, J. P. G., Oliveira Neto, L., & Rosolem, C A. (2017). Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, (85)31-37. DOI: 10.1016/j.eja.2017.02.001.

Carmo, E. L., Braz, G. B. P., Simon, G. A., Silva, A. G., & Rocha, A. G. C. (2018). Desempenho agronômico da soja cultivada em diferentes épocas e distribuição de plantas. *Revista de Ciências Agroveterinária*, (17)1, 61-69. DOI: 10.5965/223811711712018061.

Chioderoli, C. A., Mello, L. M. M., Grigolli, P. J., Furlani, C. E. A., Silva, J. O. R., & Cesarin, A. L. (2012). Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, (16)1, 37-43. DOI.org/10.1590/S1415-43662012000100005.

Companhia Nacional de Abastecimento (2023). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos*. Brasília, DF: Conab.

Crusciol, C. A. C., Nascente, A. S., Mateus, G. P., Pariz, C. M., Martins, P. O., & Borghi, E. (2014). Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. *European Journal of Agronomy*, 58, 53-62. DOI: 10.1016/j.eja.2014.05.001.

Derpsch, R., Franzluebbers, A. J., Duiker, S. W., Reicosky, D. C., Koeller, K., Friedrich, T., … Weiss, K. (2014). Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil & Tillage Research*, 137, 16-22. DOI: 10.1016/j.still.2013.10.002.

Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Severiano, E. C., Zotarelli, L., & Betioli Junior, E. (2020). Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(3), 383-386. DOI: 10.1080/03650340.2020.1733535.

Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Severiano, E. C., Nunes, M. R., Menezes, C. C. E., Antille, D. L., & Preto, V. R. O. (2023). Effectiveness of narrow tyne and double-discs openers to overcome shallow compaction and improve soybean yield in long-term no-tillage soil. *Soil & Tillage Research*, (227) 105622. DOI: 10.1016/j.still.2022.105622.

Flávio Neto, J., Severiano, E. C., Costa, K. A. P., Guimarães Junnyor, W. S., Gonçalves, W. G., & Andrade, R. (2015). Biological soil loosening by grasses from genus Brachiaria in crop-livestock integration. *Acta Scientiarum. Agronomy*, (37)3, 375-383. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i3.19392.

Girardello, V. V., Amado, T. J. C., Santi, A. L., Cherubin, M. R., Kunz, J., & Teixeira, T. G. (2014). Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4), 1234-1244. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400020.

Guarnieri, A., Costa, K. P., Severiano, E. C., Silva, A. G., Oliveira, S. S., & Santos, C. B. (2019). Agronomic and productive characteristics of maize and Paiaguas palisadegrass in integrated production systems. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(3), 1185-1198. DOI: 10.5433/1679-0359.2019v40n3p1185.

Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., & Horn, R. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research*, (194) 104293, DOI: 10.1016/j.still.2019.104293.

Lemaire, G., Gastal, F., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. F., & Dedieu, B. (2014). Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190(1), 4-8. DOI: 10.1016/j.agee.2013.08.009.

Li, S., Wu, X., Liang, G., Gao, L., Wang, B., Lu, J., … Degré, A. (2020). Is least limiting water range a useful indicator of the impact of tillage management on maize yield? *Soil & Tillage Research*, 199, 104602. DOI: 10.1016/j.still.2020.104602.

Lima, J. D. P., Torino, A. B., Silva, L. M., Nascimento Junior, L. F., Brito, M. F., Costa, K.A.P.... Severiano, E.C. Crop-livestock integration improves soil physics, agronomic and environmental aspects in soybean cultivation. *Plants*, v. 12(21), 3746, 2023. DOI: 10.3390/plants12213746.

Moraes M. T., Debiasi H., Carlesso R., Franchini J. C., & Silva V.R. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, (38) 288-298. DOI: 10.1590/S0100-06832014000100029.

Moura, M. S., Silva, B. M., Mota, P. K., Borghi, A. N. D., Resende, V. A., Acuña-Guzman, S. F., ... Curi, N. (2021). Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. *Agricultural Water Management*, 243(1) 106523. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106523.

Muniz, M. P., Costa, K. A. P., Severiano, E. C., Bilego, U. O., Almeida, D. P., Furtini Neto, A. E. ... Dias, M. B. C. (2021). Soybean yield in integrated crop–livestock system in comparison to soybean–maize succession system. *The Journal of Agricultural Science*, 159(3-4), 188-198. DOI: 10.1017/S0021859621000393.

Oliveira, I. N., Souza, Z. M., Lovera, L. H., Farhate, C. V. V., Lima, E. S., Esteban, D. A. A., & Fracarolli, J. A. (2019). Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. *Agriculture Water Management*, 225(20), 105777. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105777.

Pariz, C. M., Costa, C., Crusciol, C. A. C., Meirelles, P. R. L., Castilhos, A. M., Andreotti, M., ... Franzluebbers, A. J. (2017). Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108, 35-54. DOI: 10.1007/s10705-016-9821-y.

Peixoto, D. S., Silva, B. M., Oliveira, G. C., Moreira, S. G., Silva, F., & Curi, N. (2019). A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil & Tillage Research*, 194, 104307. DOI: 10.1016/j.still.2019.104307.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, 102(2), 242-254. DOI: 10.1016/j.still.2008.07.002.

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos L. H. C., Oliveira V. A., Lumbreras J. F., Coelho M. R. ... Cunha T. J. F. (2018). *Brazilian Soil Classification System* (5.ed). Brasília, DF: Embrapa E-book.

Statistical Analysis Software (2002). *STAT software for PC*. North Carolina: SAS Inst Inc.

Secco, D., Reinert, D. J., Reichert, J.M., Silva, V. R. (2009). Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural*, v. 39(1), 58-64, DOI: 10.1590/S0103-84782009000100010.

Severiano, E. C., Oliveira, G. C., Dias Junior, M. S., Costa, K. A. P., Silva, F. G., & Ferreira Filho, S. M. (2011). Structural changes in latosols of the cerrado region: I - relationships between soil physical properties and least limiting water range. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(3) 773-782. DOI: 10.1590/S0100-06832011000300013.

Severiano, E. C., Oliveira, G. C., Dias Junior, M. S., Curi, N., Costa, K. A. P., & Carducci, C. E. (2013). Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, 51(3), 193-202. DOI: 10.1071/SR12366.

Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of American Journal*, 58(6), 1775-1781. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x.

Silva B. M., Oliveira G. C., Serafim M. E., Silva E. A., Ferreira M. M., Norton, L. D., Curi N. (2015). Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil & Tillage Research*, 54, 103-113. DOI: 10.1016/j.still.2015.06.013.

Silva, J. F. G., Goncalves, W. G., Costa, K. A. P., Flávio Neto, J., Brito, M. F., Silva, F.C., Severiano, E.C. Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. *Semina. Ciências Agrárias*, 40(6Supl2), 2973-2990, 2019. DOI: 10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl2p2973.

Silva, J. F. G., Linhares, A. J. S. L., Gonçalves, W. G., Costa, K. A. P., Tormena, C. A., Silva, B. M., Oliveira, G. C., & Severiano, E. C. (2021). Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? *Soil& Tillage Research*, 208, 104873 DOI: 10.1016/j.still.2020.104873.

Silva, L. C. M., Peixoto, D. S., Gomes, J. B. V., Avanzi, J. C., Amorim, R. S. S., Borghi, E. ... Curi, N. (2022). Mineralogy and pore size distribution of clayey Oxisols with granular structure and the effect of management systems. *Soil & Tillage Research*, 223, 105479. DOI: 10.1016/j.still.2022.105479.

Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1989). *Statistical Methods* (8th Edition), Iowa State University Press: Ames.

Sousa, D. M. G., & Lobato, E. (2004). *Cerrado: correção do solo e adubação* (2 ed). Brasilia, DF: Embrapa.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. [technical editors]. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed). Brasilia, DF: Embrapa.

Torino, A. B., Nascimento Junior, L. F., Brito, M. F., Lima, J. D. P., Goncalves, W. G., Costa, K. A. P., & Severiano, E. C. (2020). Agronomic performance of maize and Brachiaria grasses cultivated at monocropping and intercropping in a compacted Latossolo. *Australian Journal of Crop Science*, 14(9), 1533-1540. DOI: 10.21475/ajcs.20.14.09. p2773.

Tormena, C. A., Araújo, M. A., Fidalski, J., & Costa, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 211-219, mar./abr. 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200003.

Tormena, C. A., Karlen, D. L., Logsdon, S., & Cherubin, M. R. (2017). Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil & Tillage Research*, 166, 122-130. DOI: 10.1016/j.still.2016.09.015.

USDA - Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13th ed). USDA-Natural Resources Conservation Service.

4 CAPÍTULO II

SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM LONGA DURAÇÃO PROMOVEM A SAÚDE FÍSICA DO SOLO

RESUMO: Sistemas integrados de produção agropecuária são considerados os mais eficientes e sustentáveis do ponto de vista agronômico e ambiental. No entanto, a diagnose da estrutura do solo ainda carece de refinamentos no que diz respeito à escolha do atributo indicador que melhor representa as características do ambiente edáfico. No intuído quantificar a saúde física do solo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficácia de 21 atributos físicos indicadores de qualidade e estabelecer as relações funcionais, agronômicas e ambientais, bem como definir a camada diagnóstica e quantificar efeitos diretos e indiretos da compactação em um Latossolo Vermelho cultivado por longo prazo e em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. Os tratamentos estudados consistiram em: Pastagem contínua com gramínea e pastejo animal (PAST); Sistema de integração lavoura pecuária avaliado durante a fase lavoura e sob sistema convencional (SilC); Sistema de integração lavoura pecuária, fase lavoura e sob sistema de plantio direto (SilD); Sistema de integração pecuária-lavoura, fase pecuária e sob plantio direto (SipD); Lavoura contínua sob sistema convencional de preparo do solo (LavC) e sob plantio direto (LavD) além do; cerrado nativo (CN) e; zona de manejo (ZM), considerados como referência em estrutura do solo preservada e degradada, respectivamente. Foram retiradas amostras de solo deformadas, indeformadas em monólitos e anéis volumétricos em três camadas: 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, microporosidade, macroporosidade, relação macro:microporos, capacidade de campo relativa, índice de vazios, os teores limites do intervalo hídrico ótimo (porosidade areação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e resistência à penetração), água disponível, índice S, pressão de pré-consolidação, densidade do solo à compressão de 800 kPa, densidade do solo, resistência tênsil de agregados, friabilidade de agregados, diâmetro médio geométrico de agregados, macroagregados, densidade do solo máxima pelo ensaio de proctor normal, carbono orgânico total e densidade relativa. O uso e o manejo afetaram de forma diferencial a saúde física do solo, com boa qualidade nos sistemas integrados e com destaque àqueles sob plantio direto. As camadas subsuperficiais tiveram a maior sensibilidade às alterações estruturais, podendo ser consideradas na diagnose física do solo. De todos os atributos avaliados, a macroporosidade apresentou o maior efeito direto e a maior relação com a compactação do solo. Por conseguinte, houve rearranjamento das partículas levando ao novo ambiente edáfico que, por sua vez, governa o funcionamento do solo nos limites ecossistêmicos.

Palavras-chave: agricultura conservacionista, integração lavoura pecuária, plantio direto, qualidade física do solo, compactação do solo, bioporos.

ABSTRACT: Integrated agricultural production systems are considered the most efficient and sustainable from an agronomic and environmental point of view. However, the diagnosis of soil structure still needs refinements when it comes to choosing the indicator attribute that best represents the characteristics of the soil environment. To quantify the physical health of the soil, the objective of this work was to evaluate the effectiveness of 21 physical attributes that indicate quality and establish functional, agronomic and environmental relationships, as well as to define the diagnostic layer and quantify direct and indirect effects of compaction in a Red Oxisol cultivated for long term and in different integrated agricultural production systems. The treatments studied consisted of: Continuous pasture with grass and animal grazing (PAST); Crop-livestock integration system evaluated during the cropping phase and under conventional system (SilC); Crop-livestock integration system, crop phase and direct planting system (SilD); Livestock-crop integration system, livestock phase and under direct planting (SipD); Continuous farming under conventional soil preparation system (LavC) and under direct planting (LavD) in addition to; native cerrado (CN) and; management zone (ZM), considered as a reference in preserved and degraded soil structure, respectively. Deformed, undeformed soil samples were taken in monoliths and volumetric rings in three layers: 0.00-0.05; 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m for determining the hydraulic conductivity of saturated soil, microporosity, macroporosity, macro:micropores ratio, relative field capacity, void index, the limit contents of the water range optimum (aeration porosity, field capacity, permanent wilting point and penetration resistance), available water, S index, pre-consolidation pressure, soil density at compression of 800 kPa, soil density, tensile strength of aggregates,

friability of aggregates, geometric mean diameter of aggregates, macroaggregates, maximum soil density by normal proctor test, total organic carbon and relative density. Use and management differentially affected the soil physical health, with good quality in integrated systems and especially those under direct planting. The subsurface layers had the greatest sensitivity to structural changes and can be considered in the physical diagnosis of the soil. Of all the attributes evaluated, macroporosity had the greatest direct effect and the greatest relationship with soil compaction. Consequently, there was a rearrangement of particles leading to a new edaphic environment that, in turn, governs the soil functioning within its ecosystem limits.

Keywords: conservation agriculture, crop-livestock integration, direct planting, soil physical quality, soil compaction, biopores.

4. 1 INTRODUÇÃO

Com a abundância de sol, água e solos cultiváveis, o Brasil está consolidando como a fazenda do mundo, não apenas pela capacidade em contribuir com a segurança alimentar global, mas pela liderança em práticas sustentáveis, preservando os recursos naturais e minimizando os impactos na biodiversidade.

Parte exitosa deve-se a expansão da fronteira agrícola para o cerrado brasileiro, cujos campos de produção estão inseridos em relevos suavizados e tornando-os potencialmente apto para o desenvolvimento de agricultura em larga escala, altamente mecanizada e voltada para produção e exportação de commodities (Severiano *et al*., 2013). Esta região destaca-se pela agricultura conservacionista, majoritariamente em sistemas integrados de produção agropecuária e com destaque ao plantio direto (PD) e a integração lavoura-pecuária (ILP), trazendo consigo uma série de desafios, e oportunidades promissoras (Peixoto *et al*., 2022; Bonetti *et al*., 2023; Ferreira *et al*., 2023; Nascimento Júnior *et al.,* 2023).

São sistemas altamente eficazes e que podem combinar a produção de grãos e a criação de gado na mesma área, com benefícios mútuos e promoção da saúde do solo, isto é, da resiliência e de funcionamento dentro de limites específicos (Silva *et al*., 2024a). Quando adotados por longo prazo, aumentam de produtividade (Muniz *et al*., 2021) e propiciam ganhos ambientais, como o sequestro de carbono e a mitigação dos gases de efeito estufa (Sato *et al*., 2019), o restabelecimento das funções ecológicas do solo (Silva *et al*., 2019; Lima *et al.,* 2023) e a ciclagem de energia e matéria com a consequente redução da dependência de insumos químicos (Silva *et al*., 2024b). A diversificação das atividades proporciona ainda maior rentabilidade e saúde financeira ao agronegócio, consolidando a ILP como prática recomendada para a agricultura moderna e alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS - UN, 2015) como agenda de transformação agropecuária tropical e de preservação da biodiversidade de diversas partes do mundo (Ghahramani *et al*., 2020; Sekaran *et al*., 2021; Bonetti *et al.,* 2023).

As práticas agrícolas, quando bem executadas, desenvolve um nível de complexidade e sinergismo entre solo, plantas e animais que atuam em convergência à manutenção da qualidade agroambiental (Carvalho *et al*., 2018). Por outro lado, se manejadas em condições inadequadas podem

desencadear a compactação do solo em decorrência ao tráfego de maquinário e ao pisoteio de animais (Gil *et al*., 2015; Mentges *et al.*, 2016). Esta compromete a capacidade produtiva (Silva *et al*., 2021), aumenta a erosão, resultando na degradação dos recursos hídricos superficiais pelo assoreamento e eutrofização das águas. Como consequência e no intuito de eliminar este problema os agricultores estão retomando drasticamente as operações de preparo do solo, seja ocasional (Peixoto *et al*., 2020) ou mesmo pela reconversão ao preparo anual do solo.

Entre os elementos do manejo, o preparo do solo é provavelmente a atividade que mais impacta seu comportamento (Oliveira *et al*., 2003). Essa prática não afeta apenas a estrutura do solo, mas acelera a decomposição da matéria orgânica e o fluxo de gases (Marchão *et al*., 2009a; Sant'Anna *et al*., 2016) e provoca mudanças que influenciam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros danos. Os efeitos colaterais dos sistemas convencionais de produção agropecuária afetam ainda a atividade biológica notadamente da macrofauna do solo (Marchão *et al*., 2009b).

Para cuidar do solo, portanto, é necessário então medir a qualidade, monitorar os impactos do uso e manejá-lo por meio de práticas regenerativas. As avaliações visam compreender o funcionamento nos limites ecossistêmicos e escolher o manejo mais adequado. No entanto, a diagnose da estrutura do solo ainda carece de refinamentos no que diz respeito à precisão dos atributos indicadores na representação do ambiente edáfico, notadamente daqueles que não atuam isolados, mas em interação entre si. Neste contexto, foram testadas as hipóteses que sistemas conservacionistas e integrados de produção agropecuária de longa duração melhoram a saúde física do solo e que a diagnose é afetada pelo atributo avaliado. Os objetivos deste trabalho foram: I- avaliar a eficácia e interação de 21 atributos físicos do solo que mensuram a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho Distrófico típico submetido a sistemas de preparo e de manejo com 26 anos de duração; II - testar se o emprego de estratificação da amostragem em diferentes camadas detecta adequadamente as alterações estruturais do solo em sistemas integrados de produção e; III- avaliar os efeitos diretos e indiretos da compactação do solo.

4. 2 MATERIAL E MÉTODOS

4. 2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em área pertencente ao Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa), localizada no Planalto Central Brasileiro - município de Planaltina, Distrito Federal, Bioma Cerrado, entre as coordenadas geográficas 15°39′S e 47°44′W e a 1.200 m de altitude (Figura 1). A precipitação média é de 1.400 mm e o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (Santos *et al*., 2018) [Oxisols na Keys of Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022) ou Ferralsols na World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2022)], classe textural argilosa, cuja mineralogia da fração argila é predominantemente composta por gibsita (50%), goethita (18%),

caulinita (14%), hematita (7%) e outros óxidos de ferro (Marchão *et al*., 2009a).

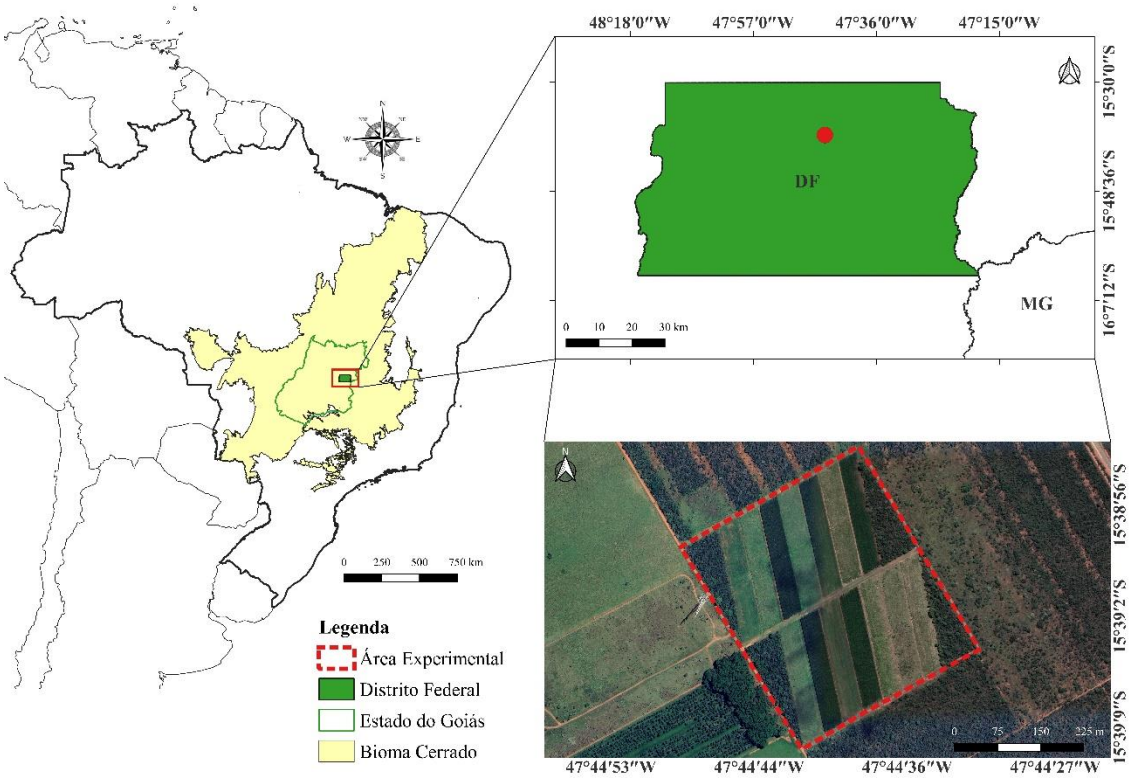

Figura 1. Localização da área experimental em Planaltina, Distrito Federal, Brasil, Bioma Cerrado.

O estudo foi realizado em um experimento com longa duração implantado em 1991 e avaliado após 26 anos, sendo o experimento de sistemas integrados de produção agropecuária mais antigo do Brasil. O histórico de uso do solo encontra-se na Tabela 1 e, para a instalação, foi primeiramente removida a vegetação nativa da área e realizado o preparo de solo utilizando arado de disco e gradagem. A correção inicial do solo ocorreu pela incorporação de corretivos e fertilizantes e, posteriormente, em superfície quando da introdução do sistema de plantio direto. O delineamento adotado foi o de blocos ao acaso, com oito usos ou manejo do solo e quatro repetições, cuja área de cada parcela experimental foi de 2.000 m^2 (50 m de comprimento e 40 m de largura). Por ocasião da amostragem de solo, os tratamentos eram:

- Pastagem contínua com gramínea (PAST), utilizando a forrageira *Brachiaria brizantha* cv Piatã e com pastejo contínuo bovino (*Bos taurus indicus*);

- Sistema de integração lavoura pecuária - por ocasião da amostragem, o sistema estava sendo cultivado com soja (fase de agricultura) e sob sistema convencional (SilC). A amostragem foi realizada aproximadamente 90 dias após o revolvimento do solo;

- Sistema de integração lavoura pecuária - a amostragem foi feita na fase de agricultura, por ocasião do cultivo de soja e sob sistema de plantio direto (SilD);

- Sistema de integração pecuária-lavoura, fase pecuária. Quando da amostragem, o sistema estava com produção animal e sob plantio direto (SipD), cultivado com *Brachiaria brizantha* cv Piatã

e com pastejo bovino;

- Lavoura contínua sob sistema convencional de preparo do solo (LavC) com arações e gradagens anuais;

- Lavoura contínua sob sistema de plantio direto (LavD);

Tabela 1. Histórico de uso do solo dos sistemas cultivados na área experimental em estudo desde 1991 até a época da colheita das amostras de solo.

Ano	Pastagem contínua (PAST)	Sistemas integrados		Lavoura contínua
		Pecuária-lavoura (SIP)	Lavoura-pecuária (SIL)	Plantio direto/Convencional (Lav)
1991	*Andropogon gayanus*	*A. gayanus*	Soja (*Glycine max*)	Soja
1992		*A. gayanus*	Soja	Soja
1993		*A. gayanus*	Milho (*Zea mays*)	Milho
1994		*A. gayanus*	Soja	Soja
1995		Milho	*A. gayanus*	Milho
1996		Soja	*A. gayanus*	Soja
1997		Milho	*A. gayanus*	Milho
1998		Soja	*A. gayanus*	Soja
1999		*P. maximum*	Soja	Soja
2000	*Brachiaria decumbens* cv. Basilisk	*P. maximum*	Milheto	Milheto
2001		*P. maximum*	Soja	Soja
2002		*P. maximum*	Milheto	Milheto
2003		*P. maximum*	Soja/*B. brizantha* cv. Marandu	Soja
2004		Soja	*B. brizantha* cv. Marandu	Soja
2005		Sorgo	*B. brizantha* cv. Marandu	Sorgo
2006		Soja	*B. brizantha* cv. Marandu	Soja
2007		Milheto + *B. brizantha* cv. Piatã	Soja	Soja
2008		*B. brizantha* cv. Piatã	Milho	Milho
2009		*B. brizantha* cv. Piatã	Soja	Soja
2010		*B. brizantha* cv. Piatã	Soja/Milho + *B. brizantha* cv. Piatã	Milho + *B. brizantha* cv. Piatã
2011	*Brachiaria brizantha* cv. Piatã	Soja	*B. brizantha* cv. Piatã	Soja
2012		Milho + *B. brizantha* cv. Piatã	*B. brizantha* cv. Piatã	Milho + *B. brizantha* cv. Piatã
2013		Soja	*B. brizantha* cv. Piatã/Soja	Soja
2014		Sorgo + *B. brizantha* cv. Piatã	Sorgo + *B. brizantha* cv. Piatã/Soja	Milho + *B. brizantha* cv. Piatã/Soja
2015		*B. brizantha* cv. Piatã	Milho + *B. brizantha*. cv. Paiaguás/Soja	Milho + *B. brizantha* cv. Paiaguás/Soja
2016		*B. brizantha* cv. Piatã	Soja	Soja
2017		*B. brizantha* cv. Piatã	Soja/Sorgo	Soja/Sorgo
2018		Soja	*P. maximum* cv. Tamani	Soja

A. gayanus=Andropogon gayanus cv. Planaltinha*; B. decumbens = Brachiaria decumbens* cv. Basilisk*; B. brizantha = Brachiaria brizantha; P. maximum. = Panicum maximum;* cv = cultivar.

O sétimo tratamento foi considerado o cerrado nativo (CN) adjacente à área de cultivo, adotado como referência em estrutura do solo preservada segundo as recomendações de Marchão *et*

al. (2007). Já o oitavo, adotado como referência de estrutura degradada foi a zona de manejo animal e de manobras de maquinário agrícola (ZM), localizada nos corredores entre os blocos.

Os sistemas integrados de produção agropecuária, fase agricultura (CLI e LCI) são mantidos por quatro anos no total, três anos agrícolas (período compreendido pela estação chuvosa de outubro a março do ano subsequente) com lavouras e alternado para pastagem no último ano para então ocorrer conversão à fase pecuária nos quatro anos seguintes, conforme os planos de rotação apresentados na tabela 1. A taxa de lotação animal é sempre definida pela disponibilidade de forragem e o sistema de pastejo utilizado é o alternado entre os blocos, com animais bovinos da raça nelore, variando a categoria para atender a taxa de lotação dimensionada.

Os sistemas com lavoura sob preparo convencional são revolvidos anualmente com grade aradora após a colheita da safra de verão a 0,25 m de profundidade e com grade niveladora antes do plantio. A frequência de revolvimento do solo para o sistema integrado (SilC) é menor, apenas nos quatro anos da fase lavoura, alternado, posteriormente com 4 anos de pecuária, sem revolvimento.

4.2.2 Protocolo de amostragem e análises de solo

A amostragem de solo foi realizada ao final de um ciclo de quatro anos de sistemas integrados e antecedendo a transições dos sistemas integrados, de lavoura para pastagem (SIL em SIP) e de pecuária para lavoura (SIP em SIL). Foram coletadas em cada bloco, quatro tipos de amostras e nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; e 0,10-0,20 m, totalizando 384 amostras (8 tratamentos x 4 repetições x 3 camadas x 4 tipos). Estas camadas foram definidas por Marchão *et al.* (2007) como as afetadas pelo uso e manejo do solo e as amostras possuíam as seguintes características:

- Uma amostra indeformada de solo em anéis volumétricos de alumínio com 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura com o auxílio de um amostrador de Uhland (amostra 1), para as análises de relações massa e volume dos constituintes do solo, testes de penetrometria e de retenção de água;
- Uma amostra indeformada de solo em anéis volumétricos de alumínio com 0,054 m de diâmetro e 0,025 m de altura com o auxílio de um amostrador de Uhland (amostra 2), e envolvidas em filme de PVC, para a avaliação do comportamento compressivo do solo;
- Uma amostra de monólitos de solo de 0,1 m de comprimento, 0,1 m de largura e 0,05 m de altura (amostra 3) através da abertura de pequenas trincheiras nas parcelas experimentais com o auxílio de espátulas e acondicionadas em recipientes plásticos para manutenção da integridade até o momento da avaliação da agregação do solo;
- Uma amostra deformada com 4 kg de solo (amostra 4) para a caracterização química e física do solo e para obtenção da curva de compactação do solo.

Em laboratório, as amostras 1 foram saturadas por elevação gradual da lâmina de água numa bandeja e em seguida submetidas ao permeâmetro de carga constante para determinação do fluxo hídrico no solo saturado (Teixeira *et al*., 2017) e, na sequência, aos potenciais de -1, -3, -6 e -10 kPa

numa mesa de tensão e -33, -60, -100, -800 e -1500 kPa em extratores de Richards. Após o equilíbrio, foram submetidas ao penetrômetro de bancada (MARCONI MA 933/30) com diâmetro basal do cone de 4 mm e velocidade de penetração de 10 mm mim^{-1} (Silva et al., 1994) e, em seguida, foram secas em estufa a 105°C por 48 horas e determinadas as massas de solo e de água. A curva de retenção de água (CRA) no solo foi ajustada ao modelo de van Genuchten (1980), o conteúdo volumétrico de água no solo (θ, dm^3 dm^{-3}) em função do módulo do potencial matricial ($|\psi_m|$, kPa). A curva de resistência à penetração (CRP) foi obtida a partir do ajuste da RP em função de θ e da Ds por meio do modelo proposto por Busscher (1990).

As amostras 2 também foram saturadas e equilibradas a -6 kPa na mesa de tensão, sendo o conteúdo de água no solo equivalente à capacidade de campo dos Latossolos segundo considerações de Severiano *et al*. (2011) e Silva *et al*. (2021). Na sequência, submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando um consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA), conforme por Severiano *et al*. (2011), as quais foram submetidas aplicação de pressões crescentes e sem o descarregamento prévio da pressão anterior (σ = 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa) até a obtenção de 90 % da deformação máxima, sendo esta monitorada através do incremento na densidade do solo. A curva de compressão do solo foi obtida ajustando graficamente o logaritmo da pressão aplicada (base 10) no eixo das abscissas e a deformação do solo no eixo das ordenadas.

Os monólitos (amostra 3) foram divididos em duas subamostras de aproximadamente 10x5x5 cm e manipulados manualmente através do rompimento dos blocos de solo em seus pontos de maior fraqueza. Numa, foram obtidos agregados com diâmetro de 4,76 - 8,00 mm, umedecidos lentamente por capilaridade, descrito por Kemper & Rosenau (1986) e submetidos ao peneiramento em água para avaliação da estabilidade de agregados. Para tanto, foram colocadas num aparelho de oscilação vertical sobre um conjunto de peneiras de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,106 mm de abertura, conforme descrito por Yoder (1936). Na sequência, transferiu-se o conteúdo retido em cada peneira para latas de alumínio, que foram levadas à estufa por 24 horas a 110°C para a secagem.

Na outra subamostra, foram obtidos com o auxílio das peneiras de 12,5 e 19 mm de diâmetro de malha, 40 agregados com diâmetro médio de 15,75 mm, os quais foram secos em estufa a 40°C por 48 h para homogeneização do teor de água pesados individualmente e submetidos ao teste de tensão indireta utilizando um dinamômetro digital eletrônico de precisão, composto por célula de carga com carga nominal de 20 kgf ligada a um microcomputador para aquisição e armazenamento dos dados. As medidas foram determinadas em agregados colocados, na posição mais estável, entre duas placas metálicas (inferior fixa e superior móvel). A placa móvel era responsável pela aplicação progressiva da força sobre os agregados até a ruptura, ou seja, até a formação de uma fissura contínua ao longo do diâmetro polar do agregado.

As amostras deformadas (amostra 4) também foram secas ao ar e subdividias. Na primeira, o

material passado na peneira de 19 mm e retido a 4,76 mm foi submetida ao ensaio de Proctor Normal, conforme Reichert *et al*. (2009), para a obtenção da curva de compactação do solo. Para tanto, seis corpos de prova foram compactados, com conteúdo crescente de água no solo. A compactação dos corpos de prova ocorreu em três camadas que receberam 25 golpes do martelo usado no ensaio e, em seguida, determinado a densidade do solo (Ds) e o conteúdo gravimétrico de água no solo (U, dm^3 dm^{-3}) correspondente. Posteriormente, foi obtida a curva de compactação do solo, ajustando-se os valores de Ds em função de U através de uma equação polinomial quadrática.

A segunda subamostra foi peneirada em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), a qual foi utilizada na determinação dos conteúdos de carbono orgânico pela oxidação com o dicromato de potássio (Walkley e Black, 1934), e utilizada na caracterização da textura do solo pelo método de pipeta e da densidade de partículas pelo método do picnômetro, conforme Teixeira *et al.* (2017).

Os 21 atributos indicadores de qualidade física do solo avaliados a partir destes procedimentos analíticos são descritos na tabela 2.

4.2.3 Análise estatística

As variáveis foram submetidas à análise de normalidade, sendo posteriormente realizada as correlações. Para variáveis com distribuição normal foi utilizado o método de Pearson, e para as não normais o de Spearman, sendo utilizado o teste de Shapiro Wilk para verificar a normalidade das variáveis. Foi considerada, correlações baixas se $r \leq |0{,}30|$, moderadas quando $|0{,}30 < r \leq 0{,}70|$, altas para $r > |0{,}70|$ ou muito altas para $r > |0{,}90|$.

Em seguida foi realizada a análise exploratória de componentes principais, sendo as variáveis previamente padronizadas ($\frac{Yi-\mu}{\sigma}$). Está análise foi realizada com objetivo de verificar a importância das variáveis na variação total dos dados, compreender de forma global a discriminação dos tratamentos e das camadas com base nas variáveis utilizadas. Uma segunda análise de componentes principais (PCA) foi realizada, ajustando todas as variáveis para que fossem interpretadas no mesmo sentido, e valores maiores indicam melhores resultados. Para isso, as variáveis originalmente interpretadas como "quanto menor, melhor" foram multiplicadas por -1. Esse ajuste uniformiza a direção dos dados, facilitando a compreensão e interpretação dos componentes principais, sendo realizado o teste de Scott-Knott utilizando os escores obtidos em cada observação.

A densidade do solo relativa (Dsrel), obtida conforme recomendações de Reichert *et al*. (2009) por meio da relação da Ds e Ds800 kPa [$Dsrel = Ds/Dsreferência\ (Ds\ 800\ kPa)$], foi considerada o indicador de degradação do solo pela compactação e, com objetivo de verificar quais são as variáveis que mais a influenciam, foi realizada a análise em trilha considerando-a como

Tabela 2. Atributos indicadores da qualidade física avaliados em um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos.

Atributo	Amostra	Unidade	Método	Fonte
Condutividade hidráulica do solo saturado (K0)	Indeformada	mm h^{-1}	carga constante; equação de Darcy-Willians	Teixeira et al. (2017)
Microporosidade do solo (Micro)	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	conteúdo de água (θ) em ψm = - 6 kPa	Teixeira et al. (2017)
Macroporosidade do solo (Macro)	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	θ em ψ_m > - 6 kPa	Teixeira et al. (2017)
Relação macro:microporos (mac:mic)	Indeformada	adimensional		Severiano et al. (2011)
Capacidade de campo relativa (CCR)	Indeformada	adimensional		Reynolds et al. (2008)
Índice de vazios (vazios)	Indeformada	adimensional		Teixeira et al. (2017)
Porosidade areação (PA pelo IHO)	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	$PA = \theta_{saturação} - 0{,}1$	Silva et al. (1994)
Capacidade de campo (CC pelo IHO)	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	θ à -6 kPa na curva de retenção de água (CRA)	Silva et al. (1994)
Ponto de murcha permanente (PMP pelo IHO)	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	θ à -1500 kPa na CRA	Silva et al. (1994)
Resistência à penetração (RP pelo IHO)	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	θ em que RP = 2,0 MPa	Silva et al. (1994)
Água disponível	Indeformada	dm^3 dm^{-3}	$AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$	Veihmeyer e Hendrickson (1949)
Índice *S*	Indeformada	adimensional	inflexão da curva de retenção de água	Santos et al. (2011)
Pressão de pré-consolidação (PPC)	Indeformada	kPa	curva de compressão do solo	Dias Júnior e Pierce (1995)
Densidade à compressão de 800 kPa (Ds800kPa)	Indeformada	kg dm^{-3}	curva de compressão do solo	Reichert et al. (2009)
Densidade do solo (Ds)	Indeformada	kg dm^{-3}	anel volumétrico	Blake & Hartge (1986)
Resistência tênsil de agregados (RT)	Monólito	kPa	tensão indireta	Dexter e Kroesbergen (1985)
Friabilidade de agregados	Monólito	adimensional	tensão indireta	Watts e Dexter (1998)
Diâmetro médio geométrico de agregados	Monólito	mm	peneiramento úmido	Kemper e Chepil (1965)
Macroagregados	Monólito	mm	peneiramento úmido	Silva et al. (2019)
Densidade do solo máxima (Dsmax)	Deformada	kg dm^{-3}	proctor normal	Reichert et al. (2009)
Carbono orgânico total (COT)	Deformada	g kg^{-1}	oxidação com o dicromato de potássio	Walkley e Black (1934)

variável dependente e as demais variáveis como variáveis independentes. Para definição do diagrama causal foi realizado análise de regressão linear múltipla utilizando o procedimento “Stepwise” com a opção “backward”. Posteriormente foi realizado o diagnóstico de multicolinearidade, considerando como fator de condição, a razão entre o maior e o menor autovalor e para verificar se é fraca e não constituindo problema para a análise. As contribuições dos efeitos diretos e indiretos das variáveis foram quantificadas percentualmente. Considerou-se alto efeito direto contribuições acima de 70% (Ribeiro *et al*., 2019). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando os pacotes “corrplot”, “lavaan” e “semPlot” do programa computacional R Development.

4. 3 RESULTADOS

A análise de correlação (Pearson e Spearman) revelou a formação de quatro grupos de variáveis (Figura 2). O primeiro grupo inclui as variáveis índice *S*, índice de vazios, PA, COT, F, Macro, mac:mic, K0 e AD, que apresentaram correlações de moderadas a altas e positivas entre si, com exceção de AD e *S*, cuja correlação não foi significativa.

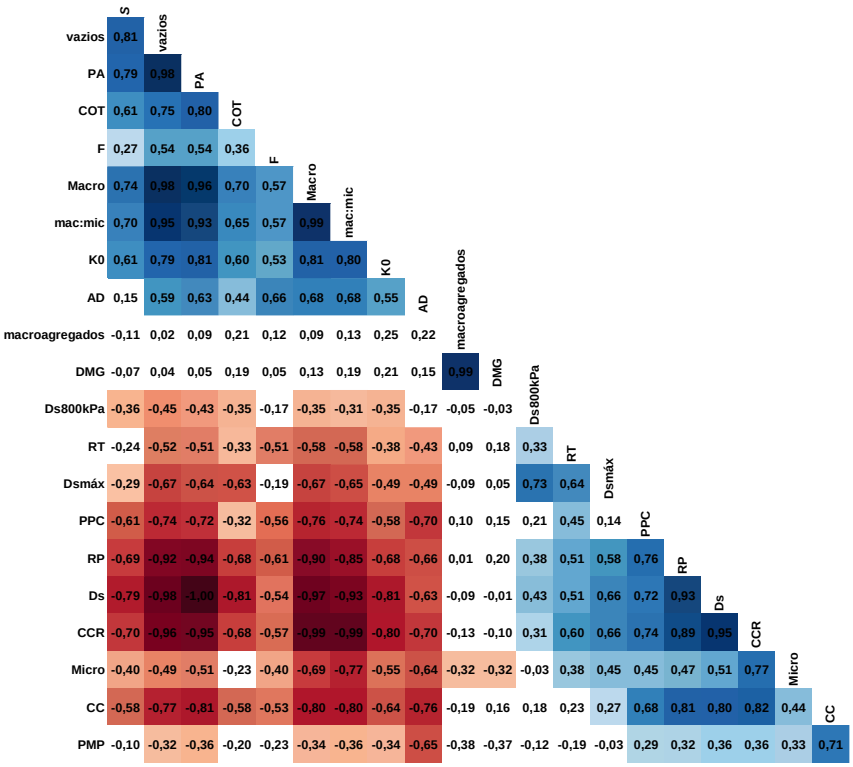

Figura 2. Correlações entre os atributos de qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos. K_0: condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; mac:mic: relação macro:microporos; CCR: capacidade de campo relativa; vazios: índice de vazios; PA: conteúdo de água no solo na porosidade de aeração do intervalo hídrico ótimo; CC: conteúdo de água no solo na capacidade de campo pela curva de retenção; PMP: conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente pela curva de retenção; RP: conteúdo de água no solo na resistência à penetração limitante pelo intervalo hídrico ótimo; *S*: índice *S*; PPC: pressão de pré-consolidação; Ds800kPa: densidade do solo pela compressão à 800 kPa; Ds: densidade do solo; Dsmax: densidade do solo máxima pelo ensaio de proctor normal; COT: carbono orgânico total; RT: resistência tênsil de agregados de solo; *F*: Friabilidade de agregados; DMG: diâmetro médio geométrico de agregados de solo; macroagregados: agregados do solo > 2,00 mm. As correlações hachuradas apresentaram significância estatística.

O segundo grupo foi composto por Ds800kPa, RT, Dsmax, PPC, RP, Ds, CCR, Micro e CC e, em ambos, todos os atributos correlacionaram-se positivamente entre si (não significativa, porém, entre PPC e Ds800kPa, PPC e Dsmax, Micro e Ds800kPa, CC e Ds800kPa, CC e RT, PMP e Ds800kPa, PMP e RT e PMP e Dsmax) e negativamente com as variáveis do primeiro grupo (não significativa entre Ds800kPa e F, RT e *S*, Dsmax e F, Micro e COT, PMP e *S*, PMP e COT e PMP e F). O terceiro grupo pelas variáveis DMG e macroagregados com correlações altas e positivas e o último grupo pela correlação negativa entre microporos e macroagregados e entre microporos e DMG.

Por outro lado, foram observadas correlações positivas e muito altas (r > 0,90) entre PA e vazios, Macro e vazios, Macro e PA, mac:mic e vazios, mac:mic e PA, mac:mic e Macro, DMG e macroagregados, Ds e RP e CCR e Ds, e negativas e igualmente muito altas (< -0,90) entre RP e vazios, RP e PA, RP e Macro, Ds e vazios, Ds e PA, Ds e Macro, Ds e mac:mic, CCR e vazios, CCR e PA, CCR e Macro e CCR e mac:mic. Assim, e por poder comprometer a identificação das variáveis mais relevantes para a variabilidade, os atributos mac:mic, CCR, vazios, PA, RP e macroagregados foram retiradas da análise de componentes principais.

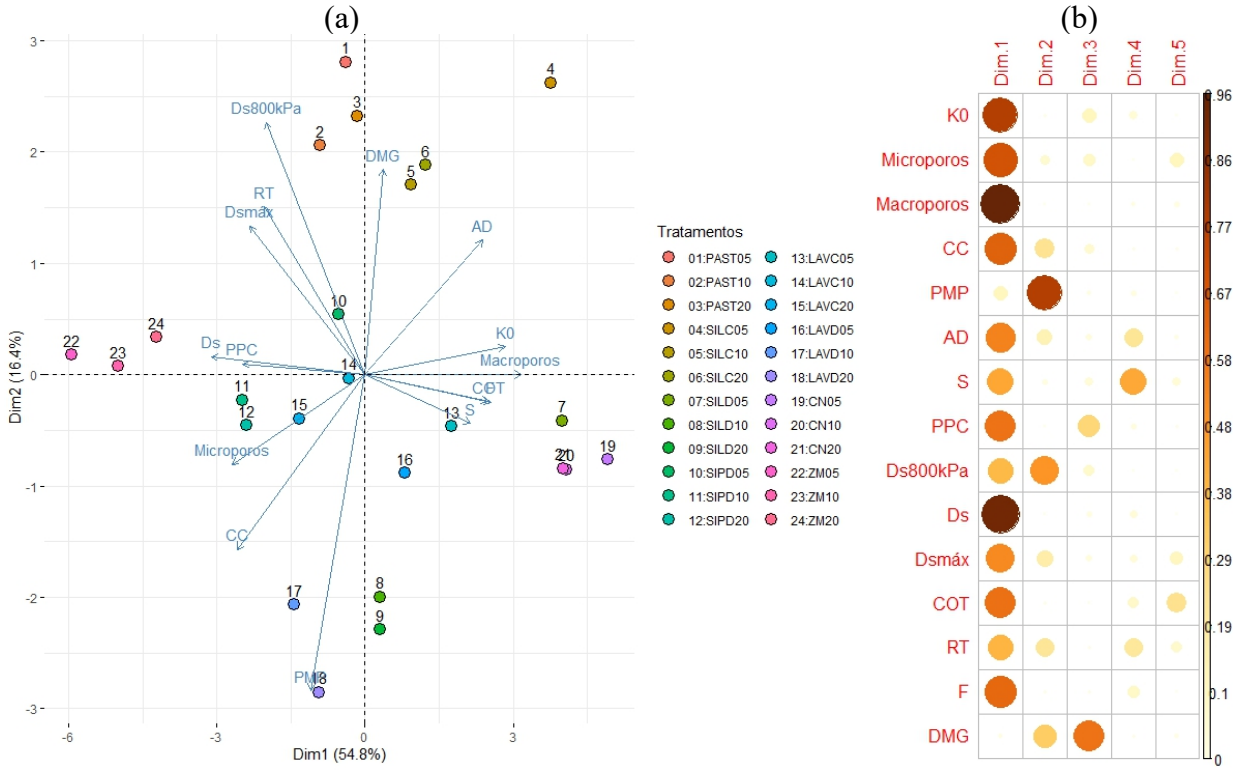

Figura 3. Dispersão bidimensional dos escores da análise de componentes principais de 15 variáveis avaliadas (a), e correlação dos atributos físicos em todas as dimensões (B) em um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos

K_0: condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; CC: conteúdo de água no solo na capacidade de campo pela curva de retenção; PMP: conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente pela curva de retenção; S: índice *S*; PPC: pressão de pré-consolidação; Ds800kPa: densidade do solo pela compressão a 800 kPa; Ds: densidade do solo; Dsmax: densidade do solo máxima pelo ensaio de proctor normal; COT: carbono orgânico total; RT: resistência tênsil de agregados de solo; F: Friabilidade de agregados; DMG: diâmetro médio geométrico de agregados de solo.

Observou-se, por esta, que as duas primeiras dimensões explicaram conjuntamente 71,2% (Figura 3), sendo também os autovalores maiores que um, e os demais componentes menores que um. A primeira dimensão (Dim1) explicou 54,8% da variação total dos dados, apresentando correlação alta e negativa (r < -0,70) com Micro e Ds, e alta e positiva (r > 0,70) com K0 e Macroporos. A segunda (Dim2) explicou 16,4% da variação total dos dados, com correlação alta e negativa com PMP.

Corroborando a correlação, é coerente a contribuição das variáveis com os componentes principais, em que os atributos que mais contribuíram com a primeira foram Macro > Ds > K0 > Micro > CC > F > COT > PPC, enquanto a contribuição de PMP > Ds800kPa > DMG > CC > RT > Dsmax foram superiores à média para a segunda dimensão (Figura 4).

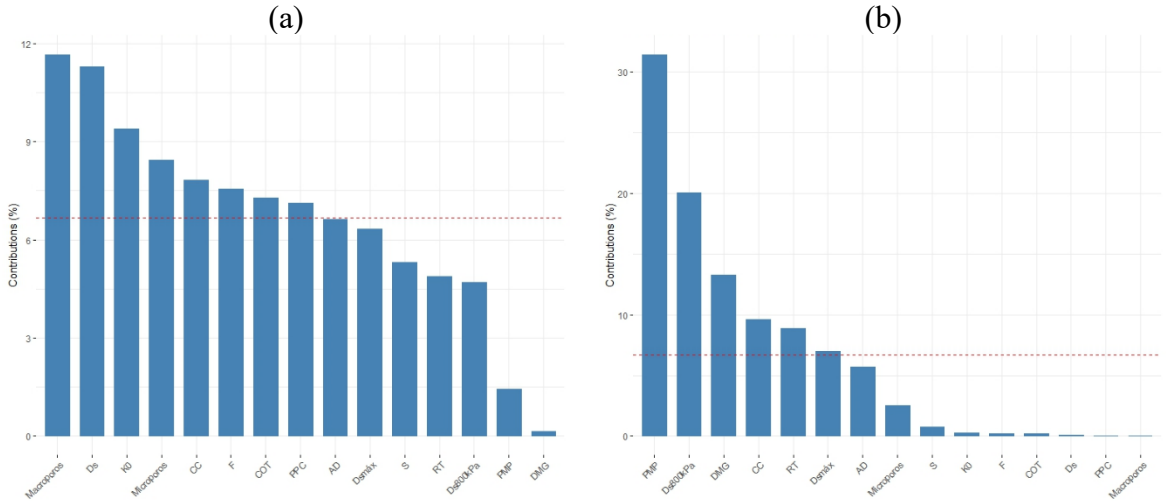

Figura 4. Contribuição das variáveis com o primeiro (A) e o segundo componente principal (B) de um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos.

K_0: condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; CC: conteúdo de água no solo na capacidade de campo pela curva de retenção; PMP: conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente pela curva de retenção; S: índice *S*; PPC: pressão de pré-consolidação; Ds800kPa: densidade do solo pela compressão a 800 kPa; Ds: densidade do solo; Dsmax: densidade do solo máxima pelo ensaio de proctor normal; COT: carbono orgânico total; RT: resistência tênsil de agregados de solo; F: Friabilidade de agregados; DMG: diâmetro médio geométrico de agregados de solo.

Pela tabela 3, é possível constatar por meio dos scores obtidos, a discriminação entre os tratamentos e camadas das duas dimensões, em que os tratamentos Past e CN não apresentam diferenças entre as camadas ao passo que SilC, SilD, SipD, LavC e LavD apresentam a melhor qualidade física a 0,05 m e ZM tendo a pior qualidade física nesta camada. Em todas as camadas, ZM tem a pior e CN a melhor qualidade física, enquanto os tratamentos sob uso agropecuários estão entre os dois controles, tendo em PAST a pior qualidade física (intermediária, porém entre os sistemas integrados e ZM). A camada de 0,10-0,20 m, por sua vez, é a que ficou discriminada, tanto no primeiro quanto na segunda dimensão.

Tabela 3. Teste de Skott-Knott dos escores obtidos da primeira e segunda dimensão dos componentes principais para atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado brasileiro submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo há pelo menos 26 anos.

Camada (m)	Tratamentos							
	Past	SilC	SilD	SipD	LavC	LavD	CN	ZM
				Primeira dimensão				
0,00-0,05	c	Aa	Aa	Ac	Ab	Ac	a	Bd
0,05-0,10	c	Bb	Bb	Bc	Bb	Bc	a	Ad
0,10-0,20	c	Bb	Bc	Bd	Bc	Bc	a	Ae
				Segunda dimensão				
0,00-0,05	c	c	Cb	b	a	Ca	b	Bc
0,05-0,10	c	c	Bb	b	b	Ba	c	Ac
0,10-0,20	d	d	Ab	c	c	Aa	d	Bd

Para cada dimensão, médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas entre as camadas, e minúsculas entre os tratamentos, não diferem entre si a 5% de probabilidade. Past: pastagem continua com gramínea; SilC: Sistema de integração lavoura-pecuária, fase lavoura, sob sistema convencional de preparo de solo; SilD: Sistema de integração lavoura-pecuária, fase lavoura, sob sistema de plantio direto; SipD: Sistema de integração pecuária- lavoura, fase pecuária, sob sistema de plantio direto; LavC: lavoura contínua sob sistema convencional de preparo de solo; LavD: lavoura contínua sob sistema de plantio direto; CN: cerrado nativo; ZM: zona de manejo animal e de manobras de maquinário agrícola.

Pela análise de regressão múltipla, verificou-se que K0, Micro, Macro, CC, PMP, índice *S*, PPC, COT e DMG foram mantidas no modelo para explicar o processo de compactação do solo, ao passo que as demais variáveis não apresentaram significância no modelo, considerando como a variável dependente a Dsrel (Tabela 4), e com coeficiente de determinação de 0,98. Macroporos apresentou correlação negativa muito alta, K0 e COT altas correlações negativas e CC e PPC, positivas. Micro apresentou correlação moderada positiva e o índice *S*, correlação moderada negativa. PMP e DMG não apresentou correlação com o Dsrel.

Tabela 4. Efeitos diretos e indiretos, correlação e coeficiente de determinação (R2) de diagrama causal da regressão múltipla de determinação da densidade do solo relativa em função dos atributos indicadores físicos.

Variáveis independentes	Efeito direto		Efeitos indiretos		Correlação	R^2
	Coeficiente	%	Coeficiente	%		
K0	-0,052	7,43	-0,648	92,57	-0,70	
Micro	-0,393	31,04	0,873	68,96	0,48	
Macro	-0,932	99,79	0,002	0,21	-0,93	
CC	0,165	19,64	0,675	80,36	0,84	
PMP	-0,039	10,89	0,319	89,11	0,28	0,98
S	-0,058	8,92	-0,592	91,08	-0,65	
PPC	0,072	9,73	0,668	90,27	0,74	
COT	-0,076	10,56	-0,644	89,44	-0,72	
DMG	-0,036	35,29	0,066	64,71	0,03	

K_0: condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; CC: conteúdo de água no solo na capacidade de campo pela curva de retenção; PMP: conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente pela curva de retenção; S: índice *S*; PPC: pressão de pré-consolidação; COT: carbono orgânico total DMG: diâmetro médio geométrico de agregados de solo.

No diagrama causal, verifica-se pela decomposição da correlação que, do total, apenas a macroporosidade do solo apresentou alto efeito direto e com contribuição de 93%, sendo a variável que mais se correlaciona à Dsrel, enquanto as demais apresentaram baixo efeito direto (Figura 5). A macroporosidade, por sua vez, apresentou efeito direto e positivo (r = 0,77) em K0 e negativo em CC (r = -0,80) e Micro (r = -0,75), além de efeito moderado positivo no índice *S* (r = 0,58) e em COT (r = 0,62), e negativo na PPC (r = -0,69).

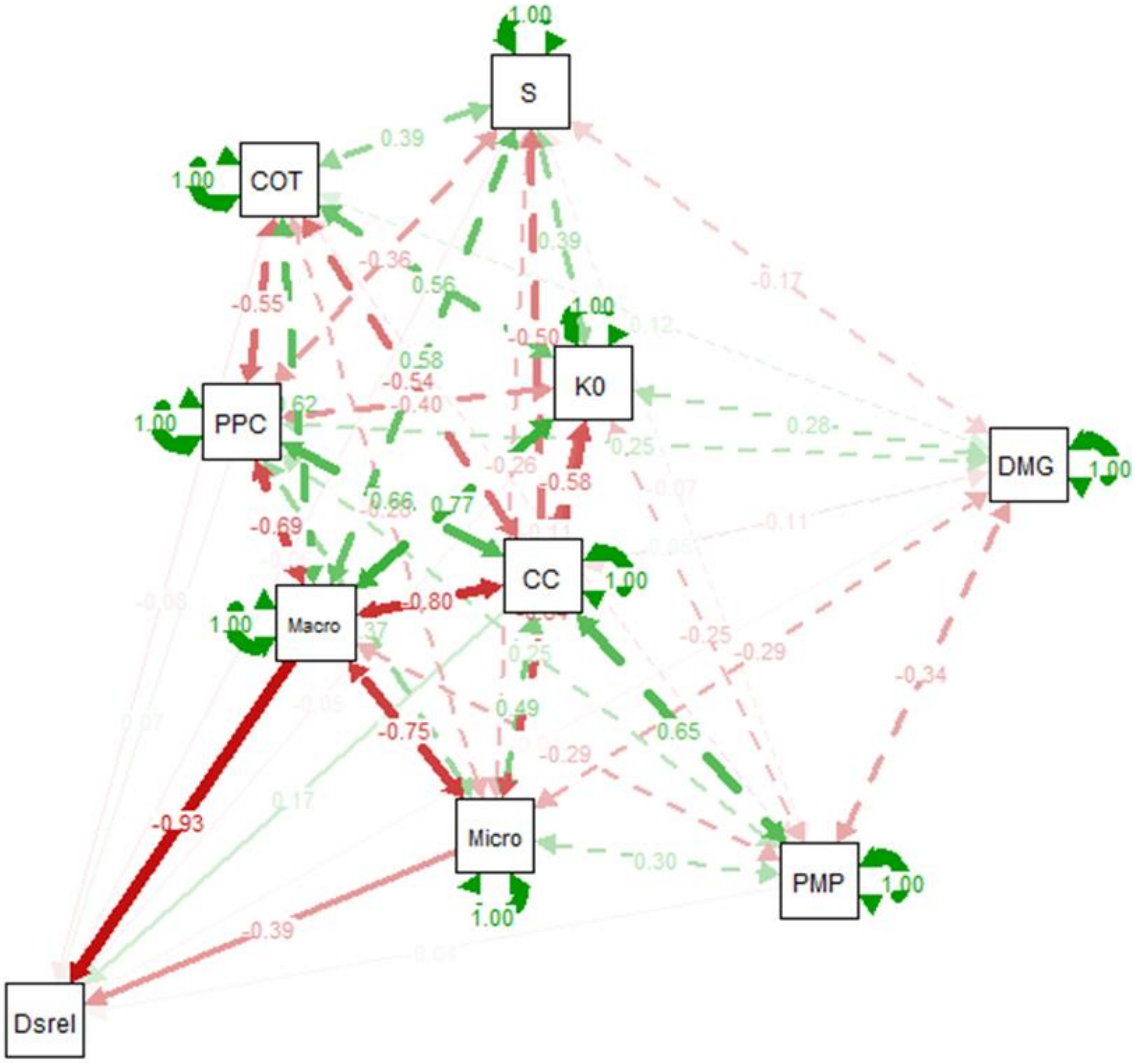

Figura 5. Diagrama causal mostrando as correlações entre as variáveis independentes e as relações causa-efeito com a densidade relativa.

Dsrel: densidade relativa (Densidade do solo/densidade do solo pela compressão a 800 kPa); Macro: macroporosidade do solo; Micro: microporosidade do solo; K_0: condutividade hidráulica do solo saturado; CC: conteúdo de água no solo na capacidade de campo pela curva de retenção; PMP: conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente pela curva de retenção; PPC: pressão de pré-consolidação; S: índice *S*; COT: carbono orgânico total DMG: diâmetro médio geométrico de agregados de solo.

4. 4 DISCUSSÃO

A análise de correlação evidencia a relação entre os 21 indicadores como resposta ao uso e ao manejo que proporcionam pedoambientes distintos e que, embora possa ser mensurado na magnitude de cada um, confere interpretações distintas acerca das alterações estruturais do solo

(Figura 2). Os atributos obtidos a partir das amostras indeformadas (amostras 1 e 2), deformadas (amostra 4) ou mesmo a resistência tênsil de agregados dos monólitos (amostra 3) correlacionaram entre si, mesmo que na diagnose física do solo seja necessário o emprego de um conjunto de variáveis, quando da correlação baixa. Por outro lado, DMG e macroagregados praticamente não se correlacionam com os demais atributos (a exceção somente com a microporosidade), mas apresenta-se muito alta entre si (r = 0,99**). Estes resultados são coerentes aos de Silva *et al*. (2019), que avaliando a integração agricultura-pecuária e a resiliência física de um Latossolo do cerrado brasileiro, constataram que a agregação do solo via peneiramento úmido não é adequada para quantificação das alterações estruturais do solo e que os macroagregados corresponderam a mais de 95% do total.

A porosidade de aeração e o índice de vazios e, igualmente, a macroporosidade, a relação mac:mic e a capacidade de campo relativa, por sua vez, apresentaram alta correlação positiva, por serem derivadas matematicamente de outras variáveis (são calculadas dos mesmos dados brutos e expressas pelas equações apresentadas na Tabela 2). Em adição, todos os casos em que duas ou mais variáveis independentes altamente correlacionadas (r > |0,90|) torna-se difícil a distinção do efeito individual de cada uma sobre a variabilidade total dos resultados. Podendo comprometer a identificação das variáveis mais relevantes para a variabilidade, o índice de vazios, a relação mac:mic, a capacidade de campo relativa, a porosidade de aeração pelo IHO, a resistência à penetração pelo IHO e a porcentagem de macroagregados foram removidas da análise de componentes principais (Figura 3).

Constata-se, por meio desta, que as duas primeiras dimensões obtidas pela análise de componentes principais explicaram mais de 70% da variabilidade total dos resultados (Figura 3a) ao passo que as demais dimensões pouco contribuíram (Figura 3b). É nítido o efeito dos tratamentos nos componentes, em que as camadas dos manejos tiveram distribuição aproximada no biplot, principalmente em PAST, CN e ZM, e mais fortemente nas camadas de 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m dos demais tratamentos. A distribuição das variáveis por meio dos seus autovetores está de acordo com as correlações, e o pequeno ângulo entre as setas demonstram alta correlação positiva (> 0,70) ao passo que as maiores angulações são associadas as altas correlações negativas (< -0,70).

Em adição, 10 das 15 variáveis usadas na análise multivariada foram obtidas a partir de amostras confinadas em anéis volumétricos e, também, as que mais contribuíram com a primeira dimensão (Macro > Ds > K0 > Micro > CC, além da PPC apresentaram-se acima da média da variação total) e, ainda, PMP e CC na segunda dimensão (Figura 4). Ademais, quatro dos atributos não constantes na PCA também são obtidos a partir destas (Tabela 2). Estes resultados demonstram, portanto, a robustez do uso de amostras indeformadas na diagnose estrutural do solo e estão em concordância com Peixoto *et al.* (2022), que utilizando a técnica de *Machine learning* como

ferramenta para o diagnóstico da compactação do solo, constataram que as variáveis mais importantes para prever o estado de compactação do solo e seus impactos sobre o rendimento da cultura foram os atributos de porosidade do solo (macroporosidade, total, microporosidade e capacidade de aeração, segundo os autores e, neste estudo, ainda a PA pelo IHO apresentou alta correlação com a maioria dos atributos avaliados e, por este motivo, também é um atributo importante - Figura 2). Este comportamento corrobora com as considerações de Reynolds *et al*. (2009) acerca das respostas imediatas ao uso e manejo sob o espaço poroso do solo, com a consequente reorganização das partículas, conferindo novo ambiente físico.

É possível constatar, por meio dos escores dos componentes principais para os atributos físicos (Tabela 3), que o uso e o manejo do solo levaram a estratificação diferencial no ambiente edáfico nos tratamentos avaliados, mas com padrão bem definido nos cinco sistemas agropecuários, notadamente em SilC, SipD e LavC. Nestes, a camada superficial não apresentou limitação física ao passo que as camadas subsuperficiais tiveram as maiores alterações estruturais, em particular em 0,10 a 0,20 m, cuja segunda dimensão conseguiu distinguir SilD e LavD. Este comportamento, já ressaltado na distribuição dos tratamentos na dispersão bidimensional dos componentes principais (Figura 3), e aqui elucidado, também foram observados por Mentges *et al*. (2016), Peixoto *et al*. (2022) e Ferreira *et al.* (2023), que consideram camadas subsuperficiais as mais restritivas. Isto se deve, além dos maiores estoques de carbono e nitrogênio das camadas superficiais (Marchão *et al*., 2009a; Sant'Anna *et al*., 2016; Sato *et al*., 2019) e da atividade biológica notadamente da macrofauna do solo (Marchão *et al*., 2009b), também à eficácia do processo de abertura do sulco de plantio pelas semeadoras para superar a compactação superficial do solo [a profundidade perturbada pelo sulco de plantio localiza-s entre 0,05 e 0,10 m, segundo Horn (2004) e Ferreira *et al*. (2023)], associada ainda as duas operações de semeadura a cada ano agrícola (Silva *et al*., 2021) e melhorando as condições de enraizamento das lavouras. Foi observado em campo, pelo espaçamento adotado na implantação dos cultivos no presente experimento (0,50 m entrelinhas), que cada operação de semeadura é capaz de mobilizar perto de 25% até 0,05 m de profundidade - a mobilização pode chegar a 50% em cada ano agrícola (devido à realização de duas safras - Tabela 1) e podendo caracterizar uma camada constantemente mobilizada em sistemas intensivos de produção agropecuária, mas que satisfaz a premissa do sistema de plantio direto do revolvimento do solo, pelo mecanismo de abertura de sulco e restrito à linha de plantio.

A zona de manejo (ZM) apresentou comportamento inverso, com a pior qualidade física na superfície e a maior degradação em subsuperfície em relação a todas as áreas (Tabela 3), por causa do intenso e constante tráfego agrícola e pisoteio animal, não tendo a ação mecânica das semeadoras e impossibilitando a ação biológica de alívio estrutural. Por sua vez, tanto no cerrado nativo quando na pastagem contínua as camadas não diferenciaram o que se deve, no primeiro caso, à ausência de

intervenção antrópica (Marchão *et al*., 2009a) num solo morfologicamente muito homogêneo (Santos *et al*., 2018) e, no outro, à ação descompactadora contínua das gramíneas, notadamente as do gênero *Brachiaria* sp. nos últimos 18 anos (Tabela 1). Corrobora-se a estees resultados, as considerações de Silva *et al*. (2019) que, avaliando a mitigação da compactação de um Latossolo cultivado com espécies do gênero *Brachiaria*, constataram que tanto a *Brachiaria decumbens* quanto a *Brachiaria brizantha* cv. Piatã foram promissoras na descompactação do solo até 0,3 m de profundidade. Em adição, Lima *et al*. (2023) que, avaliando as melhorias físicas do solo, os aspectos agronômicos e ambientais do cultivo de soja em sistemas conservacionistas, constataram que a integração agricultura-pecuária com *Brachiaria brizantha* é a principal estratégia de manejo sustentável da agricultura tropical por promover a descompactação biológica do solo. E, segundo Severiano *et al*. (2013), a compactação é um processo inevitável nos Latossolos brasileiros, ocorrendo logo após o tráfego das primeiras operações mecanizadas (Silva *et al*., 2021; Ferreira *et al*., 2023). Por fim, Nascimento Júnior *et al*. (2023) avaliando a ocorrência da compactação do solo promovida pelo pisoteio animal em sistema de integração lavoura-pecuária num Latossolo do cerrado brasileiro não constataram a ocorrência de compactação crítica (aquela capaz de limitar as funções edáficas do solo relacionadas à manutenção da porosidade drenável). Pelos autores, além do pisoteio animal não ter sido responsável pela disseminação da degradação estrutural, pode ocorrer descompactação biológica do solo por plantas forrageiras, desempenhando papel de destaque da integração lavoura-pecuária para a sustentabilidade agrícola.

Considerando, portanto, os escores das duas camadas subsuperficiais, destaca-se a melhor qualidade física do solo sob cerrado nativo na primeira dimensão, representando, provavelmente, menor compactação (densidade do solo), maior porosidade (Macro e Micro) e aumento da retenção da água na capacidade de campo (consequentemente, da AD), além da maior permeabilidade do solo (condutividade hidráulica) e da menor resistência mecânica (resistência à penetração - por conseguinte maior IHO - e pressão de pré-consolidação) e, ainda, melhor agregação (friabilidade). Com estes aspectos, os dois sistemas agropecuários com preparo do solo (SilC e LavC) foram os que mais se aproximaram da mata nativa, seguidos por SilD e LavD, que apresentaram melhor qualidade física que Past e SipD e ZM, pelos motivos supracitados.

Estes resultados sugerem que a realização de operações de aração e gradagem melhoram o ambiente edáfico por condicionar o solo em questão ao mais próximo daquele com ausência de intervenção antrópica (CN), fato confirmado, inclusive pelo teste de Skott-Knott dos scores da segunda dimensão (Tabela 3). No entanto, Peixoto *et al*. (2020) por meio de uma meta-análise global acerca dos impactos do preparo ocasional em sistemas de plantio direto ressaltam cautela quanto ao assunto. Embora haja alívio da compactação do solo em decorrência de desagregação mecânica, mas com persistência somente de 24 meses [a compactação retorna após duas safras em sistemas

convencionais de produção agropecuária, em decorrência da redução da capacidade de suporte de carga quando do sucessivo tráfego agrícola subsequente (Silva *et al*., 2021; Ferreira *et al*., 2023)], há também consequências negativas notadamente relacionadas à redução dos conteúdos orgânicos do solo (principalmente quando utilizado grades e arados e em sistemas conservacionistas já consolidados) e da biomassa de cobertura do solo, além da maior suscetibilidade à erosão e, sem ter efeitos sob o rendimento das culturas (Sato *et al*., 2019). Segundo Marchão *et al*. (2009a), o preparo convencional é considerado um dos sistemas mais agressivos de uso da terra no cerrado brasileiro por reduzir os estoques de carbono, fato este confirmado por Sant'Anna *et al*. (2016) que, avaliando a mesma área em estudo após 22 anos de cultivo, constataram que o plantio direto estoca-o, enquanto sistemas com preparo do solo ocorrem perdas significativas deste elemento, tendo os maiores conteúdos em tratamentos sob sistemas integrados de produção agropecuária.

Em contrapartida, faz-se necessário constatar se a piora da qualidade física em subsuperfície nos agrossistemas tenha atingido níveis críticos ou se apenas ocorreu incremento da compactação do solo sem, contudo, atingir valores limitantes, ressaltando a importância do correto diagnóstico da estrutural. Neste sentido, Silva *et al*. (2021), ao avaliar o intervalo hídrico ótimo em sistemas integrados com capim *Brachiaria brizantha*, afirmaram que em Latossolos altamente intemperizados do cerrado brasileiro leve compactação é considerada benéfica por incrementar a disponibilidade hídrica ao transformar parte dos macroporos em microporos e, levando ao novo ambiente edáfico. Ademais, até a profundidade aqui avaliada (0,20 m), as forrageiras cultivadas nos últimos 18 anos consagram-se como medida eficiente de mitigação da degradação física do solo, pelos motivos já expostos e em concordância a Silva *et al*. (2019) e Lima *et al.* (2023).

Concorda-se com Reichert *et al*. (2009) ao considerar a Dsrel um indicador eficiente da compactação do solo e de simples estimativa, bem como os efeitos no desempenho agronômico das culturas (Silva *et al.*, 2021; Ferreira *et al*., 2023). Ademais, é obtido a partir da densidade do solo, sendo este um atributo de grandeza intensiva, cujas características da amostra não representa qualquer risco aos resultados. A relação de causa e efeito entre os atributos avaliados indicam, pela análise em trilha, que nove dos 21 indicadores avaliados apresentaram efeitos diretos ou indiretos (Tabela 4). Os resultados demonstram alta correlação positiva da capacidade de campo e da pressão de pré-consolidação com Dsrel pelo fato de o incremento de água retida tornar o solo mais suscetível às alterações estruturais, dando maior capacidade de suporte de carga ao solo refletindo a menor compressibilidade, respectivamente. Por outro lado, a alta correlação negativa para condutividade hidráulica saturada, macroporosidade e carbono orgânico demonstram a sensibilidade das propriedades ecológicas ao processo de compactação, dada a estreita relação com o meio ambiente e com destaque para aqueles relacionados à aeração e trocas gasosas (Mentges *et al*., 2016), a infiltração de água e recarga de água subterrânea, com o consequente escoamento superficial e erosão do solo

(Nascimento Júnior *et al*., 2023).

Cabe ressaltar que as propriedades ecológicas do solo também são afetadas pela compactação do solo e antes mesmo que haja restrição ao crescimento e rendimento das plantas (Severiano *et al*., 2011; Bonetti *et al*., 2023), fazendo-se necessário um refinamento acerca da densidade relativa. Por este motivo, concorda-se com Reichert *et al*. (2009) ao considerar a Ds800 kPa em alternativa à Dsmax obtida pelo ensaio de proctor, que é o método comumente utilizado, mas que utiliza material de solo perturbado (Tabela 2) e que geralmente resulta em valores maiores de referência em contrapartida àquela obtida via amostras indeformadas e a partir do ensaio de compressão uniaxial (além de viabilizar a obtenção da Ds e a Ds de referência na mesma unidade amostral). Ademais, os valores obtidos pelo teste Proctor padrão gera valores mais altos de Dsmax, o que torna coerente esta proposição e que fortalece ao considerar o diagrama causal mostrado na figura 5, em que dos 21 indicadores avaliados a densidade relativa apresentou correlação significativa apenas com a Macro (-0,93) e esta, por sua vez, com a capacidade de campo (r = 0,80), K0 (r = 0,77), Micro (r = -0,75) e PPC (r = -0,69). Ao seguir a trilha [CC correlacionando com PMP (0,65), K0 (-0,58), PPC (0,66) e assim, sucessivamente] e ainda ao considerar que a macroporosidade teve mais de 99% do efeito direto na análise de regressão múltipla, ao passo que os outros atributos tiveram o efeito majoritariamente indireto (Tabela 4), é possível afirmar que o processo de compactação do solo atinge primeiramente os macroporos, com o conseguinte rearranjamento das partículas levando ao novo ambiente edáfico. Este, por sua vez governa o funcionamento do solo dentro dos limites ecossistêmicos.

4. 5 CONCLUSÕES

I- O uso e o manejo afetaram de forma diferencial a qualidade física do solo;

II- Os sistemas integrados de produção agropecuária mostraram-se adequados, com destaque àqueles sob plantio direto;

III- As camadas subsuperficiais tiveram a maior sensibilidade às alterações estruturais, podendo ser consideradas na diagnose física do solo;

IV- De todos os atributos avaliados, a macroporosidade mostrou-se como de maior eficácia por ser primeiramente atingido pela compactação do solo.

4. 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLAKE, G.R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** 2. ed. Madison: ASA/SSSA, p. 363-375, 1986. (Agronomy monograph, 9).

BONETTI, J.A.; ANGHINONI, I.; BREDEMEIER, C.; MORAES, M.T.; TORMENA, C.A.; GUBIANI, P.I. Physical recovery of an Oxisol under an integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69(4), p. 507-518, 2023. DOI:

10.1080/03650340.2021.2013471

BUSSCHER, W.J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. Transactions of the ASAE, 33, 519-524. DOI: 10.13031/2013.31360) @1990.

CARVALHO, P.C.F.; PETERSON, C.A.; NUNES, P.A.A.; MARTINS, A.P.; SOUZA FILHO, W.; BERTOLAZI, V.T.; KUNRATH, T.R.; MORAES, A.; ANGHINONI, I. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **Journal of Animal Science**, v. 96, p. 3513-3525, 2018. DOI: 10.1093/jas/sky085.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **J. Agric. Eng. Res**., 31:139-147, 1985. DOI.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995. DOI: 10.1016/0933-3630(95)00015-8.

FERREIRA, C.J.B.; TORMENA, C.A.; SEVERIANO, E.C.; NUNES, M.R.; MENEZES, C.C.E.; ANTILLE, D.L.; PRETO, V.R.O. Effectiveness of narrow tyne and double-discs openers to overcome shallow compaction and improve soybean yield in long-term no-tillage soil. **Soil & Tillage Research**, v. 227, p. 105622, 2023. DOI:10.1016/j.still.2022.105622.

GHAHRAMANI, A.; KINGWELL, R.S., MARASENI, T.N. Land use change in Australian mixed crop-livestock systems as a transformative climate change adaptation **Agricultural Systems** Volume 180, April 2020, 102791, 2020. DOI: org/10.1016/j.agsy.2020.102791.

GIL, J.; SEIBOLD, M.; BERGER, T. Adoption and development of integrated crop–livestock–forestry systems in Mato Grosso, Brazil. Agric. **Ecosyst.** Environ 199, 394 – 406, 2015. DOI: org/10.1016/j.agee.2014.10.008.

HORN, R.; Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. **Soil Sci. Soc**. Am. J. 68, 1131–1137, 2004. DOI:10.2136/sssaj2004.1131.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**. 1965. p. 449-510.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and Size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis. **Madison: American Society of Agronomy.** Part. 1. p.425-442. 1986. (Agronomy, 9).

LIMA, J.D.P.; TORINO, A.B.; SILVA, L.M.; NASCIMENTO JUNIOR, L.F.; BRITO, M.F.; COSTA, K.A.P.; SILVA, B.M.; SEVERIANO, E.C. Crop-livestock integration improves soil physics, agronomic and environmental aspects in soybean cultivation. **Plants**. v. 12, p. 3746, 2023. DOI:org/10.3390/plants12213746.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; SÁ, M.A.C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras**. 42, 873–882, 2007. DOI.org/10.1590/S0100-204X2007000600015

MARCHÃO, R.L.; BECQUER, T.; BRUNET, D.; BALBINO, L.C.; VILELA, L.; BROSSARD, M. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock

management systems. **Soil Tillage Res**. 103, 442–450, 2009a. DOI: org/10.1016/j.still.2008.11.002.

MARCHÃO, R.L.; LEVELLE, P.; CELINI, L.; BARBINO, L.C.; VILELA, L.; BECQUER, T.;. Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. **Pesq. Agropec. Bras.** 44, 1011–1020, 2009b. DOI: org/10.1590/S0100-204X2009000800033.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F.; AWE, G.O.; MENTGES, L.R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**. v. 263, p. 47-59, 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.042.

MUNIZ, M.P.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E.C.; BILEGO, U.O ; ALMEIDA, D.P. ; FURTINI NETO, A.E. ; VILELA, L. ; LANA, M.A. ; LEANDRO, Wilson Mozena ; DIAS, M.B.C.. Soybean yield in integrated crop-livestock system in comparison to soybean-maize succession system. **Journal of agricultural science (online**), v. 1, p. 1-11, 2021. DOI:.org/10.1017/S0021859621000393

NASCIMENTO JUNIOR, L.F.; TORINO, A.B.; SILVA, L.M.; COSTA, K.A.P.; BILEGO, U.O.; MENEZES, C.C.E.; SEVERIANO, E.C. Modeling and quantification of soil compaction promoted by animal trampling in an integrated crop-livestock system. Semina. **Ciências Agrárias**. v. 44, p. 1179-1196, 2023. DOI:10.5433/1679-0359.2023v44n3p1179.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, Moacir de Sousa ; RESCK, Dimas Vital Siqueira ; CURI, Nilton. Alterações Estruturais e Comportamento Compressivo de um Latossolo Vermelho do Cerrado sob diferentes Sistemas de Manejo por 20 anos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa).** Brasília, DF, v. 38, n.2, p. 291-299, 2003. DOI:.org/10.1590/S0100-204X2003000200017.

PEIXOTO, D.S.; SILVA, L.C.M.; MELO, L.B.B.; AZEVEDO, R.P.; ARAÚJO, B.C.L.; CARVALHO, T.S.; MOREIRA, S.G.; CURI, N.; SILVA, B.M. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment.** v. 745, p. 140887, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140887.

PEIXOTO, D.S.; SILVA, S.H.G.; MOREIRA, S.G.; SILVA, A.A.P.; CHIARINI, T.P.A.; SILVA, L.C.M.; CURI, N.; SILVA, B.M. Machine learning as a useful tool for diagnosis of soil compaction under continuous no-tillage in Brazil. **Soil Res**. v. 61. 145-158, 2022. DOI.org/10.1071/SR22048

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; 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 and Tillage Research, Amsterdam**. v. 102, n. 2, p. 242-254, Mar. 2009. DOI: 10.1016/j.still.2008.07.002

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S.; Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**. v. 146, 466–474. 2008. DOI:.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017.

REYNOLDS W.D.; DRURY C.F.; TAN C.S.; FOX C.A.; YANG X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma.** v. 152, 252–263, 2009. DOI:10.1016/j.geoderma.

RIBEIRO, F.M.; LIMA, M.; COSTA, P.A.T.; PEREIRA, D.M.; CARVALHO, T.A.; SOUZA, T.V.; SILVA, F.F.E.; COSTA, A.C. Associations between morphometric variables and weight and yields carcass in Pirapitinga Piaractus brachypomus. **Aquaculture Research,** v. Abril, p. 1-8, 2019. https://doi.org/10.1111/are.14099

SATO, JULIANA HIROMI ; DE FIGUEIREDO, CÍCERO CÉLIO ; Marchão, Robélio Leandro ; DE OLIVEIRA, ALEXSANDRA DUARTE ; VILELA, Lourival ; DELVICO, FRANCISCO MARCOS ; ALVES, BRUNO JOSÉ RODRIGUES ; DE CARVALHO, ARMINDA MOREIRA. Understanding the relations between soil organic matter fractions and N 2 O emissions in a long¿term integrated crop-livestock system. **EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE**, v. 1, p. 12819, 2019. DOI:.org/10.1111/ejss.12819.

SANT'ANNA, S.A.C.; JANTALIA, C.P.; SÁ, J.M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R.L.; ALVES, B.J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. Nutr. Cycl. **Agroecosys**. v. 108,101–120, 2016. DOI:.org/10.1007/s10705-016-9812-z.

SANTOS, G.G.; SILVA, E.M.; MARCHÃO, R.L.; SILVEIRA, P.M.; BRUAND, A.; JAMES, F.; BECQUER, T. Analysis of physical quality of soil using the water retention curve: Validity of the S-index. **Comptes Rendus Geoscience**. v. 343, p. 295-301, 2011. DOI:10.1016/j.crte.2011.02.001

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, K.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F.; Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, quinta ed.; **.**, 2018.

Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D.A.N., Kumar, S., Clay, S. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security – A review **Journal of Agriculture and Food Research**. v. 5, p. 100190, 2021. DOI:.org/10.1016/j.jafr.2021.100190.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M.; Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: I – Relationships between soil physical properties and Least Limiting Water Range. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v. 35, 773–782. 2011. DOI:.org/10.1590/S0100-06832011000300013

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; COSTA, K.A.P.; CARDUCCI, C.E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Res**. v.51, 193–202, 2013. https://doi.org/10.1071/SR12366

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal, Madison**, v. 58, n. 6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, J.F.G.; GONCALVES, W.G.; COSTA, K.A.P.; FLÁVIO NETO, J.; BRITO, M.F.; SILVA, F.C.; SEVERIANO, E.C. Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. **Semina. Ciências Agrárias**, v. 40, p. 2973, 2019. DOI:10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl2p2973.

SILVA, J.F.G.; LINHARES, A.J.S.; GONÇALVES, W.G.; COSTA, K.A.P.; TORMENA, C.A.; SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C. Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? **Soil & Tillage Research**, v. 208, p. 104873, 2021. DOI:10.1016/j.still.2020.104873.

GONÇALVES E SILVA, JOÃO ANTÔNIO ; HABERMANN, EDUARDO ; DE PINHO COSTA, KÁTIA APARECIDA ; DA SILVA, LUCIANA MARIA ; DA COSTA SEVERIANO, EDUARDO; COSTA, ADRIANO CARVALHO ; SILVA, FABIANO GUIMARÃES ; DE OLIVEIRA, THALES CAETANO ; DÁRIO, BRUNO MATHEUS MENDES ; VILELA, LOURIVAL ; PINHO COSTA, JOÃO VICTOR CAMPOS ; MARTINEZ, CARLOS ALBERTO. Integra.tion crop-livestock system

increases the sustainability of soybean cultivation through improved soil health and plant physiology. **Agriculture ecosystems & environment**, v. 359, p. 108770, 2024a. DOI:.org/10.1016/j.agee.2023.108770

SILVA, J. A. G. ; COSTA, K. A. P. ; SEVERIANO, E.C. ; SILVA, A.G. ; VILELA, L. ; LEANDRO, W.M. ; MUNIZ, M.P. ; SILVA, L. M. ; MENDONCA, K. T. M. ; BARROS, V.M.. Efficiency of Desiccation, Decomposition and Release of Nutrients in the Biomass of Forage Plants of the Genus After Intercropping with Sorghum in Integrated Systems for Soybean Productivity. **Communications in soil science and plant analysis**, p. 1-19, 2024b. DOI:10.1080/00103624.2024.2323076

Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service, 2022.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTADA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Eds.), Manual de métodos de análise de solo, 3rd ed. Brasília, 2017.

United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal, Madison**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Sci**.; v. 68, p.75-94, 1949.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci**.; v. 37, p.29-38, 1934.

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. Eur. J. **Soil Sci**.; v. 49, p. 73-84, 1998.

USS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. **Agronomy Journal, Madison**, v. 28, n. 1, p. 337-351, 1936.