

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

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA DIAGNOSE DA
COMPACTAÇÃO E NA AVALIAÇÃO DA AGRICULTURA
REGENERATIVA

Autor: Me. Alexandre Garcia Rezende
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

RIO VERDE – GO

junho - 2025

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

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA DIAGNOSE DA
COMPACTAÇÃO E NA AVALIAÇÃO DA AGRICULTURA
REGENERATIVA**

Autor: Me. Alexandre Garcia Rezende
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR 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.

Rio Verde – Go

junho de 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

R467 Rezende, Alexandre Garcia
QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA DIAGNOSE DA
COMPACTAÇÃO E NA AVALIAÇÃO DA AGRICULTURA
REGENERATIVA / Alexandre Garcia Rezende. Rio Verde

122f. il.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano.
Tese (Doutor) - Instituto Federal Goiano, curso de 0232014 -
Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio Verde (Campus
Rio Verde).

1. Compactação do solo. 2. Funções de pedotransferência. 3.
Agricultura regenerativa. 4. Qualidade física do solo. 5. Solos tropicais.
I. Título.

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 ressarcimento 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

- ☒ 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:

Alexandre Garcia Rezende

Matrícula:

2021102320140035

Título do trabalho:

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO E NA AVALIAÇÃO DA AGRICULTURA REGENERATIVA

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 22 / 09 / 2025

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ 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.

Documento assinado digitalmente
 ALEXANDRE GARCIA REZENDE
Data: 18/09/2025 10:36:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde, GO

Local

22 / 09 / 2025

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente

 EDUARDO DA COSTA SEVERIANO
Data: 18/09/2025 10:43:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 26/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO NA DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO E NA AVALIAÇÃO DA AGRICULTURA REGENERATIVA

Autor: Alexandre Garcia Rezende

Orientador: Dr. Eduardo da Costa Severiano

**TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia, Área de Concentração em
Produção Vegetal Sustentável no Cerrado**

APROVADA em 26 de junho de 2025.

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente)

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

Prof^a. Dra. Camila Jorge Bernabé Ferreira (Avaliadora externa)

Prof. Dr. Piero Iori (Avaliador externo)

Prof. Dr. Fernando Rodrigues Cabral Filho (Avaliador interno)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Eduardo da Costa Severiano**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 26/06/2025 16:18:34.
- **Fernando Rodrigues Cabral Filho**, **Fernando Rodrigues Cabral Filho - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500)**, em 26/06/2025 16:35:49.
- **Camila Jorge Bernabé Ferreira**, **Camila Jorge Bernabé Ferreira - Professor Avaliador de Banca - Universidade de Rio Verde (01815216000178)**, em 26/06/2025 16:40:14.
- **Katia Aparecida de Pinho Costa**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 26/06/2025 16:42:56.
- **Piero Iori**, **Piero Iori - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Jataí (35840659000130)** , em 26/06/2025 17:33:33.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/06/2025. 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: 716710

Código de Autenticação: f930ccd8ba



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Minha mais profunda e carinhosa gratidão à minha avó materna, Delvina Garcia. Sua sabedoria, amor incondicional e fé inabalável foram luzes constantes em minha caminhada. Suas palavras de encorajamento e seu exemplo de resiliência seguem sendo fonte diária de inspiração. A senhora me ensinou o valor da persistência e a importância de acreditar em grandes sonhos. Por isso, esta conquista também é sua.

Agradeço sinceramente a todos os meus familiares, por cada gesto de apoio, pelas palavras de conforto e pelos momentos de alegria compartilhados. Vocês são a base da minha formação humana e afetiva, e esta tese é também reflexo desse alicerce.

Aos colegas de doutorado que se tornaram grandes amigos, Camila Fonseca, Lorena Gonçalves e Ítalo de Souza, deixo meu reconhecimento pela parceria, pelas discussões que enriqueceram o processo de aprendizado e pela amizade que tornou essa jornada mais leve. Estendo esse agradecimento aos amigos de fora do meio acadêmico, cuja presença constante, mesmo à distância, foi essencial. Com suas risadas, conselhos e apoio emocional, foram abrigo e equilíbrio em meio aos desafios.

Aos professores que marcaram minha trajetória acadêmica, agradeço a dedicação e ensinamentos transmitidos ao longo dos anos. Em especial, ao professor Eduardo da Costa Severiano, meu orientador, que foi mais do que um mestre, foi um verdadeiro amigo. Sua confiança, disponibilidade e incansável empenho foram fundamentais para meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao técnico Wainer Gonçalves, agradeço a valiosa contribuição durante as atividades no laboratório de física do solo. Sua ajuda foi indispensável para a execução das análises e para minha formação prática.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal Goiano, pelo suporte institucional e pela sólida formação desde a graduação, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de estudos que viabilizou este trabalho.

Muito Obrigado!

BIOGRAFIA DO AUTOR

Alexandre Garcia Rezende, é um pesquisador em ascensão, com uma paixão por Física do Solo. Nascido em 4 de agosto de 1994, no município de Cristalina, Goiás, Brasil.

Obteve seu diploma de Bacharelado em Agronomia pelo Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí em 2018. Posteriormente, concluiu seu Mestrado em Produção Vegetal na Universidade Estadual Goiás – Campus Ipameri em 2021.

Ingressou em 2021 no Doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, finalizando em junho de 2025.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE APÊNDICES.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES.....	xiii
RESUMO GERAL.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	3
OBJETIVOS.....	5

CAPÍTULO 1. Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions

Resumo.....	6
Abstract.....	7
1.Introduction.....	8
2.Materials and Methods.....	10
<i>2.1. Experiment 1: Characterization of the experimental area and soil sampling protocol.....</i>	<i>10</i>
<i>2.1.1. Physical assessments of the soil to quantify structural changes.....</i>	<i>12</i>
<i>2.1.3. Assessment of the soil load-bearing capacity models.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2. Experiment 2: Improvements to pedotransfer functions for the structural conditions of Brazilian tropical soils.....</i>	<i>15</i>
<i>2.2.1. Particle size analysis.....</i>	<i>15</i>
<i>2.3 Statistical analyses.....</i>	<i>16</i>
3. Results.....	16
4. Discussion.....	24
<i>4.1. Considerations regarding the mineralogy, texture and structure of soils.....</i>	<i>24</i>
<i>4.2. Modelling the least limiting water range and physical degradation of soils with contrasting textures.....</i>	<i>25</i>
<i>4.3. Compressive behaviour of soils.....</i>	<i>29</i>

<i>4.4. Improvements to pedotransfer functions.....</i>	31
5. Conclusions.....	34
Acknowledgements.....	35
References.....	35
Anexo A.....	45

CAPÍTULO 2. Agricultura regenerativa na qualidade física do solo e no potencial de recarga hídrica subterrânea

Resumo.....	46
Abstract.....	46
1. Introdução	47
2. Material e Métodos.....	49
<i>2.1. Especificação das áreas amostrais e caracterização das fazendas analisadas.....</i>	49
<i>2.2. Procedimentos amostral e avaliações de campo.....</i>	53
<i>2.3. Procedimentos laboratoriais.....</i>	54
<i>2.4. Tratamento estatístico dos resultados.....</i>	55
3. Resultados	58
4. Discussão.....	65
<i>4.1. Camadas de solo de impedimento mecânico.....</i>	65
<i>4.2. Caracterização física de pedoambientes de produção em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro.....</i>	66
<i>4.3. Diagnose da compactação do solo.....</i>	68
<i>4.4 Agricultura regenerativa e funções edáficas governadas pela estrutura do solo.....</i>	70
5. Conclusão.....	74
Agradecimentos.....	75
Referências.....	75
Anexo B.....	86
Conclusão Geral.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 1 - Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions

Table 1. Classification and texture of Brazilian tropical soils.....15

Table 2. Adjustment coefficients of the equations for water retention and the penetration resistance curve for Brazilian tropical sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférico típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils.....17

Capítulo 2 - Agricultura regenerativa na qualidade física do solo e no potencial de recarga hídrica subterrânea

Tabela 1. Localização e caracterização de fazendas de agricultura regenerativa no Cerrado brasileiro.....52

Tabela 2. Efeitos diretos e indiretos, correlação e coeficiente de determinação (R^2) de diagrama causal da regressão múltipla na determinação de atributos associados às funções edáficas controladas pela estrutura do solo e em função de aspectos de solo e de agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro.....62

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 - Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions

Figure 1. Locations of the sampling areas in Neossolo Quartzarênico Órtico típico (R₇₃) and Latossolo Vermelho Acriférrio típico.....11

Figure 2. Texture classification triangle of the diagnostic horizons of two representative Brazilian tropical soils.....12

Figure 3. Variation in soil water content (θ) with bulk density (Bd) relative to the field capacity (θ_{FC} : $\psi_m = -0.006$ MPa), permanent wilting point (θ_{PWP} : $\psi_m = -1.5$ MPa), air porosity of $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{AP}) and soil penetration resistance of 2.5 MPa (θ_{PR}) (A), and least limiting water range (LLWR) (B) in sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils. bBd: beneficial bulk density to increase soil water retention; cBd: critical bulk density for plant development, corresponding to LLWR = 0.....18

Figure 4. Macroporosity as a function of the increase in bulk density (Bd) on sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils.....19

Figure 5. Load-bearing capacity models for additional compaction (σ_p), beneficial for water retention (σ_b) and limiting for reducing soil macroporosity at $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (σ_l) in sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils.....20

Figure 6. Distribution of particles by size in representative Brazilian tropical soils analysed using particle size methods.....21

Figure 7. Bulk density under four structural conditions [iBd: initial bulk density for natural conditions; bBd: beneficial density to increase water retention; lBd: limiting bulk density for a reduction in macroporosity to $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$; cBd: critical density for plant growth and yield, based on the least limiting water range (LLWR)], according to the clay content calculated using the pipette, Bouyoucos and ultrasound methods in Brazilian tropical soils.....22

Figure 8. Initial bulk density (iBd), which is beneficial in terms of increasing water retention in the soil (bBd), is limiting due to the reduction in macroporosity at 0.10 dm^3

dm⁻³ (IBd) and critical to plant growth and yield based on the least limiting water range (cBd) as a function of total clay in the soil extracted by ultrasonic dispersion (A) and due to the clay plus silt content analysed by the pipette, Bouyoucos or ultrasound methods (B) in Brazilian tropical soils.....23

Capítulo 2 - Agricultura regenerativa na qualidade física do solo e no potencial de recarga hídrica subterrânea

Figura 1. Mapa político do Brasil mostrando o Bioma Cerrado, o Estado de Goiás, o sudoeste goiano, os municípios amostrados e os pontos representando os locais de amostragem.....50

Figura 2. Funções de pedotransferência para o diagnóstico de compactação do solo, com ênfase na densidade inicial do solo (Dsi), a que é limitada pela redução da macroporosidade em 0,10 dm³ dm⁻³ (Dsl) e a crítica para o crescimento e produtividade das plantas com base no intervalo hídrico ótimo (Dsc) em função da argila total no solo em solos tropicais brasileiros.....57

Figura 3. Resistência do solo à penetração, normalizada, em fazendas de agricultura regenerativa no Cerrado brasileiro.....58

Figura 4. Dispersão bidimensional dos escores (A) e correlograma (B) da análise de componentes principais de 10 variáveis físicas do solo avaliadas em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro.....59

Figura 5. Contribuição das variáveis físicas do solo com a primeira (A), a segunda (B), a terceira dimensão (C) e acumulada nas três juntas (D), da análise de componentes principais avaliadas em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro.....60

Figura 6. Distribuição dos valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila no perfil de solo em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro.....61

Figura 7. Diagrama causal mostrando as correlações entre as variáveis independentes (linha tracejada) e as relações causa-efeito com atributos associados às funções edáficas controladas pela estrutura do solo (linha cheia) nas variáveis densidade relativa (Dsr), condutividade hidráulica saturada (K0) e permeabilidade ao ar (Kear), em função de aspectos de solo e de agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro.....63

Figura 8. Potencial de recarga hídrica subterrânea mensurada pela condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em função do índice de agricultura regenerativo quantificado a partir das práticas agrícolas adotadas em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.....	64
Figura 9. Potencial de trocas gasosas entre solo e atmosfera mensurada pela permeabilidade ao ar (K_{ar}) em função da densidade do solo relativa obtida por funções de pedotransferência* em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.....	64

ÍNDICE DE APÊNDICES

Capítulo 1 - Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions

Figure A. Pedotransfer functions for soil compaction diagnosis, with emphasis on the initial bulk density (iBd), which is limited by macroporosity at $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (iBd) and critical to plant yield based on the least limiting water range (cBd) as a function of total clay in the soil (A) or the clay plus silt content (B) in Brazilian tropical soils.....45

Capítulo 2 - Agricultura regenerativa na qualidade física do solo e no potencial de recarga hídrica subterrânea

Figura A. Talhões de agricultura regenerativa agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro e integrantes do Projeto Regenera Cerrado.....86

Figura B. Fotografias dos procedimentos de amostragens de solo.....87

Figura C. Resistência do solo à penetração (RP, MPa) em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.....88

Figura D. Relação entre a diagnose da compactação do solo realiza em campo e em laboratório em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.....89

Planilha A. Descrição das práticas e índice de agricultura regenerativa agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro.....90

Planilha B. Julgamento da compactação do solo em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.....95

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

(r) - análise de correlação de Pearson

μm^2 - micrometro quadrado

AD - água disponível

APD - água prontamente disponível

Aw - Tropical Úmido

bBd - beneficial bulk density in terms of water retention

Bd - bulk density

cBd - critical bulk density

CCr - capacidade de campo relativa

$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ - centímetro cúbico por centímetro cúbico

Dim1 - primeira dimensão

Dim2 - segunda dimensão

$\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ - decímetro cúbico por decímetro cúbico

Dp - densidade de partículas

Ds - densidade do solo

Ds rel - densidade relativa

Dsc - densidade crítica para o crescimento e produtividade das plantas com base no intervalo hídrico ótimo

Dsi - densidade inicial do solo

Dsl - densidade limitada pela redução da macroporosidade

Dsr - densidade do solo relativa

FPTs - funções de pedotransferência

g kg^{-1} - gramas por quilograma

GPS - Global Position System

IAR - índice de agricultura regenerativa

iBd - initial bulk density

IF Goiano - Instituto Federal Goiano

K0 - permeabilidade de água

Kear - permeabilidade ao ar

kg - quilograma

Ki - SiO₂:Al₂O₃ ratio

kPa - quilopascal

Kr - SiO₂:(Al₂O₃ + Fe₂O₃) ratio

IBd - limiting bulk density to macroporosity

LLWR - least limiting water range

m - metros

Mac_Mic - relação entre macro e microporos

Macro - macroporosidade do solo

Mg ha⁻¹ - megagramas por hectare

Micro - microporosidade do solo

mm - milímetros

mm h⁻¹ - milímetros por hora

MPa - mega Pascal

NaOH - hidróxido de Sódio

PCA - análise de componentes principais

PRC - soil penetration resistance curve

PT - porosidade total

PTFs - pedotransfer functions

R² - coeficiente de determinação

RefBd - reference bulk density

RP - resistência a penetração

RP normalizado - resistência à penetração normalizada

rpm - rotação por minuto

SWR_{FC} - soil water-retention curve at field capacity

TCS - total clay in soil

TP - total porosity

°C - celsius

θ - water content

θ_{100kPa} - conteúdo de água retido a 100 kPa

θ_{1500kPa} - conteúdo de água retido a 1.500 kPa

θ_{AP} - water content at air porosity

θ_{CC} - conteúdo de água equivalente à capacidade de campo

θ_{FC} - water retention at field capacity

θ_{PR} - water content corresponding to soil penetration resistance at 2.5 MPa

θ_{PWP} - water content at the permanent wilting point

θ_s - conteúdo de água do solo em condição de saturação

σ - pressure

σ_b - beneficial pressure

σ_l - limiting pressure

σ_p - preconsolidation pressure

Ψ_m - water potential

RESUMO GERAL

REZENDA, A. G. **Qualidade física do solo na diagnose da compactação e na avaliação da agricultura regenerativa**. 2025. 114p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia. Instituto Federal Goiano – *Campus* Rio Verde – GO, Brasil.

A compactação do solo é reconhecida como uma das principais formas de degradação física, afetando negativamente as funções edáficas essenciais à produtividade agrícola e ao equilíbrio ambiental. Em solos tropicais brasileiros, caracterizados por grande variabilidade textural, a definição de valores de referência para atributos físicos é fundamental para subsidiar o diagnóstico estrutural e orientar estratégias de manejo. Partindo da hipótese de que os valores dos atributos físicos são dependentes da textura do solo e influenciados pelos métodos analíticos de determinação, este estudo modelou a compactação em dois solos com texturas contrastantes: um arenoso, com 73 g kg⁻¹ de argila, e outro muito argiloso, com 823 g kg⁻¹ de argila. Amostras indeformadas desses solos foram submetidas a ensaios de compressão uniaxial, permitindo a quantificação de alterações estruturais por meio de parâmetros como densidade do solo (Bd), faixa de água menos limitante, porosidade total e pressões associadas à resistência mecânica (σ_p , σ_b e σ_l). Os resultados evidenciaram que o solo arenoso apresenta restrições severas quanto à disponibilidade de água para as plantas, enquanto o solo muito argiloso mostrou elevada suscetibilidade à compactação. A relação inversa entre o teor de argila e os valores de Bd sob diferentes condições estruturais permitiu o ajuste e a atualização de funções de pedotransferência específicas para esses contextos texturais. Recomenda-se, portanto, a quantificação do teor total de argila ou, alternativamente, a consideração da soma de frações texturais inferiores a 0,05 mm (argila + silte), especialmente em solos com características de pseudossilte. Dando continuidade à investigação dos processos de degradação e recuperação física do solo, o estudo avaliou os efeitos da adoção da agricultura regenerativa como alternativa de manejo sustentável, visando mitigar os impactos da compactação e melhorar a capacidade de infiltração e recarga hídrica subterrânea em ambientes agrícolas do Cerrado brasileiro. Foram analisados nove talhões distribuídos em oito fazendas no sudoeste de Goiás, em que se calculou um Índice de Agricultura Regenerativa (IAR) com base em cinco princípios fundamentais de manejo. Amostras indeformadas de solo foram coletadas em três profundidades (superficial, rasa e rasa-moderada) e avaliadas quanto à densidade do solo, porosidade, condutividade hidráulica saturada (K_o), permeabilidade ao ar (Kear) e retenção de água. O diagnóstico da compactação foi realizado por meio de funções de pedotransferência previamente ajustadas para os solos da região. Os resultados demonstraram avanços na qualidade física da camada superficial nas áreas com maior adoção de práticas regenerativas, evidenciando efeitos iniciais na redução da densidade do solo e no aumento da condutividade hidráulica. No entanto, a compactação nas camadas rasa e rasa-moderada ainda persiste como limitação importante, restringindo a funcionalidade do solo. A análise multivariada apontou a macroporosidade como o principal atributo discriminante das condições estruturais. Além disso, o IAR demonstrou influência positiva, embora ainda

modesta, sobre a condutividade hidráulica e a densidade relativa do solo. Conclui-se que a agricultura regenerativa apresenta potencial para restaurar a qualidade física dos solos tropicais, mas a eficiência está diretamente relacionada ao tempo de adoção e à implementação efetiva e integral de seus princípios, destacando-se a necessidade de diversificação dos cultivos como estratégia central para a recuperação estrutural desses ambientes.

Palavras-chave: Compactação do solo; Funções de pedotransferência; Agricultura regenerativa; Qualidade física do solo; Solos tropicais.

ABSTRACT

REZENDA, A. G. **Qualidade física do solo na diagnose da compactação e na avaliação da agricultura regenerativa**. 2025. 115p. Thesis (Doctorate in Agricultural Sciences – Agronomy. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Brazil.

Soil compaction is a major form of physical degradation, severely impacting soil functions essential for agricultural productivity and environmental sustainability. In Brazilian tropical soils with contrasting textures, defining reference values for physical attributes is crucial for structural diagnosis and management planning. This study aimed to model soil compaction in a sandy soil (73 g kg⁻¹ clay) and a very clayey soil (823 g kg⁻¹ clay), proposing reference bulk density (Bd) values associated with beneficial or critical structural conditions. Undisturbed soil samples were subjected to uniaxial compression tests, with structural changes quantified through Bd, least limiting water range, porosity, and mechanical pressures (σ_p , σ_b , and σ_l). Results indicated a severe water availability limitation in the sandy soil and high compaction susceptibility in the very clayey soil. The inverse relationship between clay content and Bd reference values allowed for the refinement of pedotransfer functions tailored to specific textural classes. Following this, the study assessed the impact of regenerative agriculture as a sustainable management strategy to mitigate compaction and improve water infiltration and groundwater recharge in the Brazilian Cerrado. Field assessments were carried out in nine plots across eight farms in southwestern Goiás, using a Regenerative Agriculture Index (RAI) based on five core management principles. Undisturbed soil samples were collected at three depths (surface, shallow, and moderately shallow layers) and evaluated for bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity (K_s), air permeability (K_{ear}), and water retention. Soil compaction diagnosis was performed using region-specific pedotransfer functions. The results showed initial improvements in surface layer physical quality under higher regenerative management levels, but subsurface compaction remained a significant constraint. Multivariate analysis identified macroporosity as the key attribute distinguishing structural conditions. The RAI had a modest yet positive influence on soil hydraulic conductivity and relative density. The study concludes that while regenerative agriculture has potential to restore tropical soil physical quality, its effectiveness is correlated with longer adoption periods and comprehensive implementation of its principles, especially crop diversification.

Keywords: Soil compaction; Pedotransfer functions; Regenerative agriculture; Soil physical quality; Tropical soils.

INTRODUÇÃO GERAL

A transformação de áreas naturais, a amplificação da exploração territorial e os métodos agrícolas não sustentáveis colaboraram para a deterioração disseminada dos solos (Gibbs; Salmon, 2015; IPCC, 2020; Singh *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020). Somando-se a isso, o avanço da mecanização nos processos agrícola junto ao incremento no porte dos equipamentos, amplificou as forças exercidas sobre solos cultivados, ocasionando elevação sem precedentes nos índices de compactação do solo (Keller *et al.*, 2019).

Este contexto aumenta a chance de superar a capacidade adaptativa dos solos diante das mudanças climáticas previstas (IPCC, 2020), delineando uma situação preocupante, visto que a integridade pedológica representa a base fundamental da subsistência nutricional global. Por conseguinte, o desafio fundamental para a humanidade reside em gerar alimentos suficientemente abundantes para uma população crescente e economicamente mais favorecida, observando os limites ambientais do planeta (Willett *et al.*, 2019).

Nesse contexto, o Brasil sendo um dos principais produtor agrícola mundial, com a projeção de suprir 40% da demanda global de alimentos até 2050 (Lopes; Guimarães, 2016), tem a obrigação de equilibrar a segurança alimentar com o uso consciente e eficiente dos recursos naturais. Dessa forma, modelo de agricultura sustentável não é apenas um conceito, mas uma necessidade urgente para garantir o futuro do agronegócio brasileiro e a preservação da biodiversidade.

O principal empecilho no cumprimento desse desafio é o fato da agricultura brasileira ser massivamente realizada em solos com alto grau de intemperismo, especialmente em Latossolos que configuram como os solos mais suscetíveis à degradação do mundo (Severiano *et al.*, 2013; Rezende *et al.*, 2025). Assim, o maior obstáculo a ser superado é a compactação do solo, um problema que afeta a qualidade do solo e compromete a produção vegetal, além de contribuir para a erosão e a degradação ambiental. Compreender o comportamento físico desses solos é vital para evitar esses impactos negativos e até mesmo reverter quadros de improdutividade.

Essa compreensão pode ser realizada através da modelagem da compactação do solo e o uso das Funções de Pedotransferência (PTFs). As PTFs são ferramentas

poderosas que permitem prever as condições estruturais do solo a partir de análises mais simples. Elas são cruciais para diagnosticar mudanças na estrutura do solo causadas pelo uso e pelas práticas de manejo, oferecendo dados valiosos para subsidiar tomada de decisões. Apesar da existência de estudos importantes que desenvolveram PTFs para o Cerrado (Severiano *et al.*, 2011), ainda há a necessidade de expandir e validar essas funções para abranger toda a diversidade dos solos brasileiros. O futuro da agricultura depende de um esforço coordenado e contínuo para encontrar estratégias que minimizem os impactos negativos e promovam a recuperação e a sustentabilidade dos solos.

Nesse sentido, surge um modelo de agricultura que vem popularizando mundialmente, chamado de agricultura regenerativa, caracterizado por Daverkosen *et al.* (2022), como um método agrícola em evolução contínua, multifacetado e contextualmente variável, que almeja recuperar e revitalizar solos deteriorados e auxiliar na adaptação aos fenômenos climáticos alterados, proporcionando simultaneamente vantagens mitigatórias. Na agricultura regenerativa, o solo constitui o elemento fundamental para reconsiderar os sistemas de produção alimentícia, visando potencializar as funções ecossistêmicas biológicas, estruturais, nutricionais e socioculturais em reação às circunstâncias ecológicas e ao desequilíbrio climático, tanto em escala regional quanto planetária.

Entretando, apesar das vastas quantidades de relatos de eficiência da agricultura regenerativa em várias partes do mundo (LaCanne; Lundgren, 2018; Sherwood; Uphoff, 2000; Xu *et al.*, 2019; Luján Soto *et al.*, 2021; Tittonell *et al.*, 2022), seu desempenho em condições de agricultura tropical é pouco relatado e mais escasso ainda quando se refere a pedoambientes em que se pratica a agricultura brasileira. Fazendo-se extremamente necessários estudos nessas regiões, pela relevância no cenário mundial de produção de alimentos.

REFERÊNCIAS

DAVERKOSEN, L., HOLZKNECHT, A., FRIEDEL, J. K., KELLER, T., STROBEL, B. W., WENDEBERG, A.; JORDAN, S. The potential of regenerative agriculture to improve soil health on Gotland, Sweden. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 185, n. 6, p. 901–914, 13 dez. 2022.

GIBBS, H. K.; SALMON, J. M. Mapping the world's degraded lands. **Applied Geography**, v. 57, p. 12–21, fev. 2015.

IPCC. Summary for Policymakers: Special Report on Climate Change and Land. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: IPCC, 2020. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

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

LACANNE, C. E.; LUNDGREN, J. G. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. **PeerJ**, v. 6, p. e4428, 26 fev. 2018.

LOPES, A. S.; GUIMARÃES, G. L. R. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. In: *[S.l.: S.n.]*. p. 1–72.

LUJÁN SOTO, R., MARTÍNEZ-MENA, M., CUÉLLAR PADILLA, M.; DE VENTE, J. Restoring soil quality of woody agroecosystems in Mediterranean drylands through regenerative agriculture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 306, p. 107191, fev. 2021.

REZENDE, A. G., SOUZA, I. R. M. DE, FONSECA, C. M., DELMOD, J. G., SILVA, E. A., COSTA, K. A. DE P.; SEVERIANO, E. DA C. Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: Implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions. **Geoderma**, v. 459, p. 117395, jul. 2025.

SEVERIANO, E. DA C., CÉSAR DE OLIVEIRA, G., JUNIOR, M. DE S. D., CURI, N., COSTA, K. A. DE P.; CARDUCCI, C. E. 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**, v. 35, n. 3, p. 773–782, jun. 2011.

SEVERIANO, E. DA C., OLIVEIRA, G. C. DE DIAS JÚNIOR, M. DE S., COSTA, K. A. DE P., SILVA, F. G., & FERREIRA FILHO, S. M. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 193, 2013.

SEVERIANO, E. DA C., OLIVEIRA, G. C. DE DIAS JÚNIOR, M. DE S., COSTA, K. A. DE P., SILVA, F. G., & FERREIRA FILHO, S. M. Agricultural Management Practices and Soil Organic Carbon Storage. *In: Soil Carbon Storage. [S.l.]*: Elsevier, 2018. p. 207–244.

SHERWOOD, S.; UPHOFF, N. Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture. **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 85–97, ago. 2000.

TITTONELL, P., EL MUJTAR, V., FELIX, G., KEBEDE, Y., LABORDA, L., LUJÁN SOTO, R.: DE VENTE, J. Regenerative agriculture—agroecology without politics? **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, 2 ago. 2022.

WILLETT, W., ROCKSTRÖM, J., LOKEN, B., SPRINGMANN, M., LANG, T., VERMEULEN, S., GARNETT, T., TILMAN, D., DECLERCK, F., WOOD, A., JONELL, M., CLARK, M., GORDON, L. J., FANZO, J., HAWKES, C., ZURAYK, R., RIVERA, J. A., DE VRIES, W., MAJELE SIBANDA, L., ... MURRAY, C. J. L. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. **The Lancet**, v. 393, n. 10170, p. 447–492, fev. 2019.

XU, N., BHADHA, J. H., RABBANY, A.; SWANSON, S. Soil Health Assessment of Two Regenerative Farming Practices on Sandy Soils. **Sustainable Agriculture Research**, v. 8, n. 4, p. 61, 19 out. 2019.

YANG, T.; SIDDIQUE, K. H. M.; LIU, K. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01118, set. 2020.

OBJETIVOS

Geral:

Avaliar a qualidade física do solo como ferramenta diagnóstica da compactação e como indicador da efetividade de práticas de agricultura regenerativa.

Específicos:

- Avaliar a compactação de dois solos com texturas contrastantes;
- Definir valores benéficos, limitantes ou críticos de compactação para valores de referência de densidade do solo para condições estruturais do solo associadas a funções edáficas;
- Aplicar as funções de pedotransferência na avaliação da compactação em área de agricultura regenerativa;
- Verificar a influência das práticas de agricultura na qualidade física do solo.

CAPÍTULO I

Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions

*Artigo publicado na revista Geoderma, volume 459, pag. 117395
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117395>*

Resumo: A compactação é um dos principais vetores de degradação física do solo em escala global. Para enfrentá-la, é necessário definir valores de referência em solos representativos para a interpretação estrutural. A hipótese deste estudo é que, para a modelagem da compactação utilizando funções de pedotransferência em solos tropicais brasileiros, a proposição de valores de referência para atributos físicos do solo é intrínseca à textura e pode ser influenciada por aspectos analíticos de sua determinação. O objetivo foi modelar a compactação em solos tropicais brasileiros contrastantes, avaliando dois solos com texturas distintas, definindo valores de referência de densidade do solo benéficos ou limitantes/críticos para condições estruturais associadas às funções edáficas, além de fornecer melhorias às funções de pedotransferência para avaliar a estrutura do solo considerando os aspectos analíticos dos atributos físicos. Para atingir esse objetivo, amostras indeformadas foram coletadas em um solo arenoso, com 73 g kg⁻¹ de argila, e em um solo muito argiloso, com 823 g kg⁻¹ de argila. Essas amostras foram submetidas a compactação adicional por ensaio de compressão uniaxial, e as alterações estruturais foram quantificadas por meio do aumento da densidade do solo (Bd), da faixa de água menos limitante, da porosidade do solo e das seguintes pressões: pré-consolidação (σ_p), benéfica (σ_b) e limitante (σ_l). Os resultados indicaram que as principais limitações físicas do solo arenoso estão relacionadas a muito baixa capacidade de fornecer água às plantas, tornando as culturas altamente suscetíveis ao estresse hídrico nesses pedoambientes. Já para o solo muito argiloso, a suscetibilidade à compactação é a maior preocupação em termos de respostas ao manejo. Os valores de referência de Bd em todas as condições estruturais do solo diminuíram com o aumento do teor de argila, e a quantificação possibilitou a atualização de funções de pedotransferência para as classes texturais dos dois solos modelado. Assim, sugere-se a quantificação do teor total de argila no solo ou, alternativamente, o estabelecimento de uma condição limite a partir da soma das frações texturais menores que 0,05 mm (argila + silte), uma vez que esses solos, especialmente

os muito argilosos, apresentam características de pseudossilte, ainda que essa seja uma descrição meramente descritiva e não funcional.

Palavras-chaves: Propriedades físicas de solos tropicais; Intervalo hídrico ótimo; Compressibilidade do solo; Pseudossilte; Latossolo; Neossolo Quartzarênico.

Abstract: Compaction is a serious driver of physical soil degradation worldwide. To address, it is necessary to define reference values in representative soils for structural interpretation. The hypothesis of this study is that, for the compaction modeling using transfer functions for Brazilian tropical soils, the proposition of reference values for soil physical attributes is intrinsic to soil texture and may be influenced by the analytical aspects of their determination. The aim was to model soil compaction in contrasting Brazilian tropical soils by evaluating two soils with contrasting textures, defining beneficial or limiting/critical reference bulk density values for structural conditions associated with edaphic functions, and providing improvements to pedotransfer functions to assess soil structure by considering the analytical aspects of soil physical attributes. To achieve this aim, undisturbed soil samples were collected from sandy soil with 73 g kg⁻¹ clay and very clayey soil with 823 g kg⁻¹ clay. These samples were subjected to additional compaction by uniaxial compression testing, and structural changes were quantified through increases in bulk density (Bd), the least limiting water range, soil porosity, and the following pressures: preconsolidation (σ_p), beneficial (σ_b) and limiting (σ_l). The results indicated that the main physical limitations of sandy soil are related to its very low ability to supply water to plants, making crops very susceptible to water stress in these pedoenvironments, whereas for very clayey soil, susceptibility to compaction is of the greatest concern for management responses. The Bd reference values under all the structural conditions of the soil decreased with increasing clay content and quantifying them made it possible to update pedotransfer functions for the textural ranges of the two modelled soils. Thus, it is suggested to quantify the total clay in soil or, alternatively, establishing a boundary condition of the sum of textural fractions smaller than 0.05 mm (clay + silt), as these soils, especially very clayey soils, are pseudosilt, though this characteristic is merely descriptive and not functional.

Keywords: Physical properties of tropical soils, least limiting water range, soil compressibility, pseudosilt, Latossolo, Neossolo Quartzarênico.

1. Introduction

Maintaining a delicate balance of food security while ensuring the efficient use of natural resources has been the focus of discussions around sustainable agriculture worldwide. Scientific knowledge about soils and their potentialities and limitations has led to the development of production systems, and in Brazil, these systems are even more relevant given their global contribution to the 4 Fs (food, feed, fibre and fuel) and the need to maintain biodiversity (Silva et al. 2021). Estimates show that agricultural production in the country will meet 40% of the global food demand by 2050 (Lopes and Guilherme, 2016), when the world population is expected to exceed 9.7 billion people. However, this will require high investments in technologies and reduced dependence on international markets [Brazil's agriculture imports up to 60% of the phosphorus and more than 90% of the potassium used, according to the FAO (2022)]. In addition, illegal deforestation represents a significant threat, putting the future of agribusiness at risk (Rajão et al., 2020) and emphasizing the need for the efficient use of already anthropized natural resources through the development of good agricultural practices.

In Brazilian tropical zones, which are currently considered the main agricultural frontier of the world, agriculture is carried out primarily on highly weathered soils (Marques et al., 2004), especially Latossolos [Oxisols in the USA Soil Taxonomy, USDA (2014); Ferralsols in the World Reference Base for Soil Resources, IUSS Working Group WRB (2006)]. Sandy loam soils have a fine texture (minimum clay content equal to or greater than 150 g kg⁻¹ relative to the original material) and cover approximately 46% of the territory. The difficulties in the management of these soils have been gradually overcome by the adoption of specific technologies, such as acidity and fertility correction (Simon et al., 2022) and the development of improved varieties and inputs for plant protection, with an emphasis on converting degraded pasture areas into conservationist systems such as no-till (Moura et al., 2021) or crop–livestock integration (Silva et al., 2019a).

However, agricultural expansion has led to new areas composed mostly of sandy soils, which are classified as Neossolos Quartzarênicos [Entisols (Quartzipsamments) in Soil Taxonomy; Arenosols in WRB]. According to Donagemma et al. (2016), these soils occupy approximately 8% of the Brazilian territory (680,000 km²) and are especially significant in this region and morphologically similar to Latossolos, although they are pedogenetically poorly weathered and taxonomically distinct (Santos et al., 2018).

Because of their formation on gentle slopes, they were indiscriminately inserted into the production process by farmers without due care regarding their use and conservation.

Therefore, understanding the physical behaviour of Brazilian tropical soils is crucial for agricultural sustainability, especially considering that the susceptibility to compaction increases with increasing clay content, which is a particular characteristic due to the low load-bearing capacity of clayey and very clayey soils (Severiano et al., 2013). This is a major issue for sustainable land use in various parts of the world given the limitations it imposes on edaphic functions associated with plant production, as well as the environmental degradation processes linked to soil erosion, disruption of the hydrological cycle, and siltation and eutrophication of surface water bodies (Severiano et al., 2011a, b). Consequently, unproductive agricultural fields with environmental liabilities are common (Reis et al., 2021), making global planning necessary, along with a coordinated effort to find strategies that minimize or mitigate negative impacts on the structure of these soils or even promote recovery actions.

Thus, modelling soil compaction by compressive behaviour [i.e., a decrease in porosity through the application of external loads, according to Severiano et al., 2013)] is both timely and necessary for the accurate identification of soil physical properties used in diagnosing structural changes resulting from land use and management practices. The appropriate definition of reference values based on soil compaction modelling studies can support decision-making regarding the use of natural resources and the suitability of management practices in production fields (Amorim et al., 2022).

Predicting soil physical behaviour is possible using pedotransfer functions (PTFs), which can estimate certain properties associated with the structural condition of the soil, which are generally difficult or laborious to measure based on other attributes that are easily obtained through laboratory analyses (Severiano et al., 2011a). The accuracy of the results obtained depends, fundamentally, on the robustness, breadth and precision of the database, which is associated with the representativeness of the evaluated soils. Several soil attributes are used in these functions, with texture being the most common (Reichert et al., 2009) and the starting point for land use planning. In this context, tropical soil science has made significant efforts towards advancements (Mello et al., 2025) and methodological solutions, particularly in the analysis of highly weathered soils (Barbosa et al., 2021).

Considering this, Severiano et al. (2011a) developed pedotransfer functions (PTFs) for bulk density and soil texture in order to predict the structural conditions of

soils in the Brazilian Cerrado, ranging from undisturbed conditions or those promoting optimal water–plant relations to severely degraded states caused by compaction. However, that study likely did not encompass the full textural spectrum of highly weathered soils used for agriculture in Brazil, as both sandy and very clayey soils were included only in the initial modeling. This highlights the need for specific efforts aimed at evaluating and validating global PTFs.

Therefore, the aim of the present study was to model the soil compaction of contrasting Brazilian tropical soils using the following approaches: 1) evaluate the compaction of two soils with contrasting textures; 2) define beneficial, limiting or critical values of compaction to bulk density reference values for structural conditions of soil associated with edaphic functions; and 3) provide improvements to pedotransfer functions to evaluate the soil structure by considering the analytical aspects of soil physical attributes.

2. Materials and methods

2.1. Experiment 1: Characterization of the experimental area and soil sampling protocol

To conduct this study, two experimental areas under native vegetation adjacent to areas intended for the production of annual grain crops were initially selected. According to the Brazilian Soil Classification System (Santos et al., 2018), the sandy soil is a Neossolo Quartzarênico Órtico típico [or Typic Quartzipsamments (USDA, 2014)] located in the municipality of Paraúna (16°58'45" S and 50°25'59" W, at an elevation of 662 m), and the very clayey soil is a Latossolo Vermelho Acriférico típico (or Typic Haplustox) located in the municipality of Acreúna (17°13'03" S and 50°23'35" W, at an elevation of 657 m), southwest of the state of Goiás, Brazil (Figure 1).

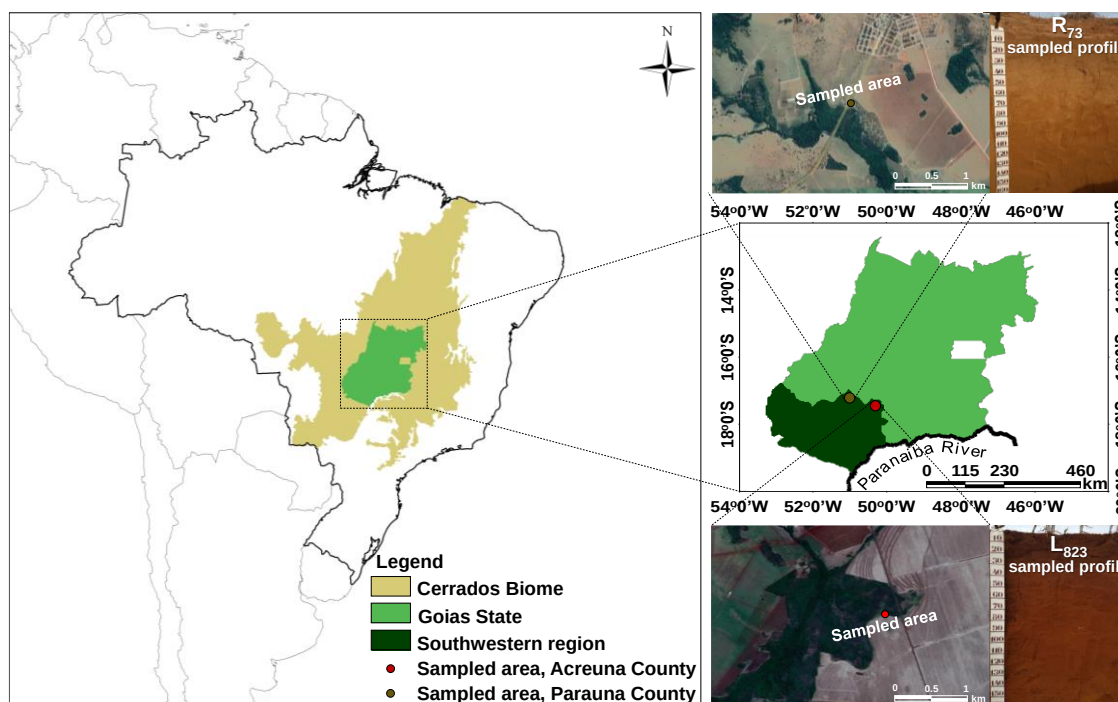


Figure 1. Locations of the sampling areas in Neossolo Quartzarênico Órtico típico (R₇₃) and Latossolo Vermelho Acriférico típico (L₈₂₃) soils in the state of Goiás, Brazil. The subscribed number in the legend of the soils corresponds to the clay content (g kg⁻¹).

From the sampling pits, which had dimensions of 1 m × 1 m × 2 m, 128 soil samples with preserved structures were randomly collected between depths of 0.80 and 1.00 m for each soil type in aluminium rings measuring 6.4 cm in diameter × 2.5 cm in height using a Uhland sampler, with a total of 256 samples collected for the study. In accordance with the recommendations of Severiano et al. (2013) and due to the morphological uniformity of these soils, sampling was carried out in subsurface diagnostic horizons, where the soil structure is truly expressed.

The soils contained 902, 26, and 72 g kg⁻¹ (sandy soil), and 66, 372, and 563 g kg⁻¹ of sand, silt, and clay, respectively (very clayey soil), in the C2 and Bw1 diagnostic horizons. These were classified into classes according to the textural triangle (Figure 2), based on measurements obtained through a standard analytical procedure. The total contents of sand, silt, and clay, determined by ultrasonic dispersion extraction (as described in Section 2.2.1), were 903, 24, and 73 g kg⁻¹ and 66, 111, and 823 g kg⁻¹, respectively. Therefore, in our study, the soils are referred to as R₇₃ and L₈₂₃. Other characteristics include particle densities (Pd) of 2.64 and 3.04 kg dm⁻³, soil organic matter contents of 4 and 24 g kg⁻¹, and oxide contents by sulfuric acid digestion of 3 and 42 g kg⁻¹ of SiO₂, 6 and 169 of Al₂O₃ and 1 and 267 g kg⁻¹ of Fe₂O₃, respectively. The molecular ratios of Ki (SiO₂:Al₂O₃) and Kr (SiO₂:(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] were 0.7 and 0.6 for

R_{73} and 0.4 and 0.2 for L_{823} , respectively. The Latossolo that was evaluated is among those with the lowest sand content in Brazil, which is associated with the Serra Geral Formation basalts, as shown from the dated Pre-Cretaceous Velhas geomorphic surfaces (Marques et al., 2004). The Neossolo has the lowest clay and sandstone contents from the same geological era; however, due to its high quartz content, the Neossolo has undergone little pedogenetic development.

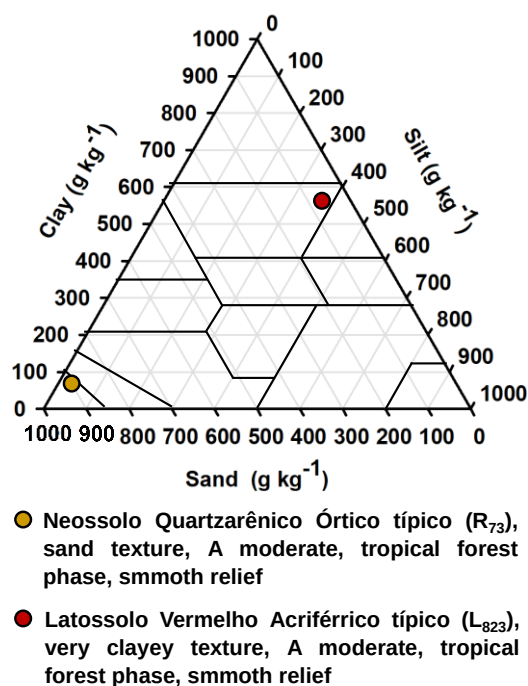


Figure 2. Texture classification triangle of the diagnostic horizons of two representative Brazilian tropical soils.

2.1.1. Physical assessments of the soil to quantify structural changes

For each soil type, the study followed a 4×8 factorial scheme with four replications, with 4 water tension values in the soil ($\Psi_m = -0.002, -0.006, -0.033$ and -1.5 MPa) and 8 levels of compaction, corresponding to the soil without any prior compression (natural conditions) and to the pressures applied by a Terralload S-450 pneumatic consolidometer (Durham Geo Enterprises, USA) ($\sigma = 25, 50, 100, 200, 400, 800$ and 1600 kPa), as carried out by Severiano et al. (2011a). The samples were prepared in the laboratory, saturated by capillary action, and balanced with the aforementioned matrix potentials on a tension table (ecoTech Umwelt-Meßsysteme GmbH, Germany) and a Richards extractor (SoilMoisture Equipment Corp, USA). A single pressure was subsequently applied to each sample (except samples that received 1600 kPa, which were

subjected to the complete uniaxial compression test with increasing pressures applied without prior unloading of the previous pressure), until reaching 90% of the maximum deformation, which was monitored by the increase in bulk density.

After compression for each described loading value, the samples were resaturated and subjected to a matrix potential of -0.006 MPa until hydraulic balance was reached. At this matrix potential, the water content represents the microporosity of the soil (Teixeira et al., 2017) and is equivalent to the field capacity of these soils, according to suggestions by Severiano et al. (2011a). Afterwards, the samples were readjusted to the water content in the soil corresponding to the initially evaluated tensions and then subjected to the penetrometry test using a bench penetrometer (Marconi MA-933, Brazil), with a displacement speed of 10 mm min⁻¹ and automatic data recording. The samples were then dried in an oven (Tecnal TE-393, Brazil) at 105 °C for 48 hours to determine the water content corresponding to the water tension in the soil and the bulk density (initial or before compression and final or after compression; this measurement was taken generically as Bd). The total porosity (TP) was determined using equation (1), whereas the soil macroporosity was obtained from the difference between the TP and microporosity (Teixeira et al., 2017), where Pd is the particle density.

$$TP = [1 - (Bd/Pd)] \quad \text{Eq. 1}$$

The water retained at -0.006 MPa was measured, the base volume (θ_{FC} , dm³ dm⁻³) was adjusted depending on the Bd, and the soil water-retention curve at field capacity (SWR_{FC}) was generated. A soil penetration resistance curve (PRC) was obtained by adjusting the PR values as a function of the water content (θ) and Bd using the model proposed by Busscher (1990).

To determine the least limiting water range (LLWR) (Silva et al., 1994), the soil water contents were adjusted according to the Bd and by considering the upper limit to be the lowest value between the water content in the soil retained at field capacity (θ_{FC}) and that in which the air porosity (θ_{AP}) was 10%, which was calculated for each sample using equation 2:

$$\theta_{AP} = TP - 0.1 \quad \text{Eq. (2)}$$

The lower limit, the permanent wilting point (θ_{PWP}), was determined as the water being retained at -1.5 MPa via gravimetric correction to the volumetric content [$\theta_{PWP} =$

$U_{-1.5MPa} * Ds$, according to the recommendations of Silva et al. (2021)], and/or the water content corresponding to the soil penetration resistance (θ_{PR}) at 2.5 MPa, considered by Severiano et al. (2011a) as a mechanical constraint for the evaluated soils.

Four structural conditions of the soil were considered based on the following Bd reference values: (1) initial bulk density (iBd), which is the Bd obtained before compression; (2) beneficial bulk density in terms of water retention (bBd), which indicates the Bd at the highest value of the LLWR; and (3) critical bulk density (cBd), the bulk density at which the LLWR reaches zero for any soil water content, resulting in a physical limitation to water availability for plant development. Additionally, adjusted linear regressions between Bd and macroporosity were used to determine the value of this limiting attribute to the edaphic functions of the soil related to water infiltration and groundwater recharge, which was considered the value of Bd corresponding to a macroporosity of $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, according classical recommendations established in studies by Kiehl (1979), Oliveira et al. (2003), Centurion et al. (2007), Oliveira et al. (2007), Severiano et al. (2008), Reichert et al. (2009), Sales et al. (2010), Severiano et al. (2011a), Peixoto et al. (2019), Linhares et al. (2020), Silva et al. (2021) and Nascimento Júnior et al. (2023). Thus, (4) the limiting bulk density for macroporosity (lBd) was defined.

2.1.3. Assessment of the soil load-bearing capacity models

The soil compression curve was obtained by graphically adjusting the logarithm of the applied pressure (base 10) on the abscissa axis and the soil deformation on the ordinate axis for each sample subjected to the complete uniaxial compression test. The preconsolidation pressure values (σ_p) were determined according to the methodology described by Teixeira et al. (2017). The applied pressure values located in the virgin compression curve region and corresponding to the levels of additional beneficial compaction were determined (σ_b), as were the limiting edaphic functions of the soil (σ_l), using the Bd reference values for bBd and lBd; these values were determined according to the procedures described above and using the free-flow electronic spreadsheet to determine the parameters of the soil compression curve proposed by Severiano et al. (2011b). The soil load-bearing capacity models were adjusted using equation 3, which allows the pressure σ to be calculated as a function of Ψ_m :

$$\sigma = a\Psi_m^b \quad \text{Eq. (3)}$$

Alternatively, we have the linearized equation:

Eq. (4)

$$\log \sigma_p = \log a + b \log \Psi_m$$

Parameters a and b represent empirical model adjustment parameters.

2.2. Experiment 2: Improvements to pedotransfer functions for the structural conditions of Brazilian tropical soils

To update the initially proposed pedotransfer functions, the iBd, bBd, cBd, and lBd values of the two soils studied here were incorporated into the other five values evaluated by Severiano et al. (2011a). Table 1 presents the previous characterization, locations and textures of these soils.

Table 1. Classification and texture of Brazilian tropical soils ⁽¹⁾.

Soil	Geographical coordinates	Brazilian Soil Taxonomy ⁽²⁾	Texture ⁽³⁾						
			VCS	CS	MS	FS	VFS	S	C
			----- g kg ⁻¹ -----						
L ₁₅₂	17°31'18"S; 51° 38'07"W	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico	1	21	343	433	25	25	152
L ₂₆₃	17°35'01"S; 51°37'12"W	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	4	9	172	441	50	61	263
L ₃₉₉	17°46'02"S; 51°02'17"W	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	1	16	159	276	35	114	399
L ₅₂₁	17°47'26"S; 50°57'17"W	LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico	1	14	94	139	30	201	521
L ₇₁₆	17°30'52"S; 51°34'05"W	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	1	3	43	68	11	158	716

⁽¹⁾ Source: Severiano et al. (2011a). ⁽²⁾ According to the Brazilian soil classification system (Santos et al., 2018). ⁽³⁾ VCS: very coarse sand (2.00-1.00 mm); CS: coarse sand (1.00-0.50 mm); MS: medium sand (0.50-0.25 mm); FS: fine sand (0.25-0.105 mm); VFS: very fine sand (0.105-0.05 mm); S: silt (0.05–0.002 mm); and C: clay (< 0.002 mm). The subscribed number in the legend of the Latossolos (L) corresponds to the clay content (g kg⁻¹).

2.2.1. Particle size analysis

To quantify the relationship between reference bulk density values for structural conditions of soil associated with edaphic functions and texture (here, the term refers to the distribution of primary mineral particles by size), three procedures were used: the pipette, Bouyoucos, and ultrasound methods.

Initially, the soil samples were dispersed by rapid agitation (10,000 rpm) for 20 minutes in a cocktail shaker (Hamilton Beach, USA) with 1 N NaOH in contact for 24 hours. Sand particles (2.00–0.05 mm) were quantified by screening, clay particles (<

0.002 mm) by the pipette method, and silt particles (0.05–0.002 mm) by calculating the difference between the total soil content and the sand and clay contents (Gee & Bauder, 1986). The textural analysis also included the Bouyoucos method (Bouyoucos, 1951), with slow agitation (50 rpm) in a Wagner shaker (Tecnal TE-160/24, Brazil) and 1 N NaOH in contact with the sample for 16 hours. This method was performed according to the Brazilian soil analysis methods manual, where sand, silt, and clay quantification was carried out by suspension density analysis (Teixeira et al., 2017).

Quantification was carried out using ultrasonic dispersion energy with a sonicator (Bandelin, Germany) at 85 W for 5 minutes on 10 g of soil, which corresponds to an energy of 127.5 J ml⁻¹ (Ribeiro et al., 2017). Sand particles were quantified by screening, clay particles (referred to in this research as total clay in soil, or TCS) were determined by the pipette method, and the number of silt particles was calculated as the difference between the total soil content and the sand and clay contents.

2.3. Statistical analyses

All the statistical analyses and regression adjustments were performed using SAS software. The SWR_{FC} and PRC were adjusted using the PROC GLM and PROC REG routines (SAS Institute, 1999). All graphics were created using SigmaPlot 11.0 software (Jandel Scientific). Comparisons between the soil load-bearing capacity models and pedotransfer functions for the textural fractions (clay and clay + silt) were carried out following the procedures of Snedecor & Cochran (1989), which test the homogeneity of the data (F) and the significance of the angular and linear coefficients of the linearized equations.

3. Results

Table 2 presents the adjusted equation curves for soil water retention (SWR_{FC}) and penetration resistance (PRC), with the respective coefficients adjusted for R₇₃ and L₈₂₃. For R₇₃, it was not possible to adjust θ as a function of Bd (nonsignificant adjustment), whereas the other equations presented $p < 0.01$. For L₈₂₃, the coefficients were highly significant, as evidenced by the F and R² values. For the PRC, the adjustments were significant for both soils, and the coefficients differed between the studied soils (Table 2).

Table 2. Adjustment coefficients of the equations for water retention and the penetration resistance curve for Brazilian tropical sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils.

Solo	Soil water retention curve ¹	Penetration resistance curve ²
R ₇₃ ^A	ns	$PR = 0.00001 \theta^{-1.36} Bd^{13.30}$
L ₈₂₃ Vwf ^B	$SWR_{FC} = -0.6298 + 1.7645 \theta Bd - 0.6682 \theta^2$	$PR = 0.28 \theta^{-1.28} Bd^{5.62}$
1	^A ns ^B F= 675.59; p < 0.01; R ² =0.92; n=128	2 ^A F= 95.47; p < 0.01; R ² =0.62; n=128 ^B F= 68.97; p < 0.01; R ² =0.75; n=128

θ : soil water content (dm³ dm⁻³); Ψ soil matrix potential (kPa); Bd (bulk density (kg dm⁻³); PR (penetration resistance, MPa). ns: not significant. The subscribed number in the legend of the soils corresponds to the clay content (g kg⁻¹).

Figure 3 shows the variation in the critical limits of the LLWR (Figure 3A) and the absolute values as a function of Bd (Figure 3B). The field capacity of R₇₃ is expressed by the average water content in the 128 analysed samples, given the nonsignificance of the SWR_{FC} (Table 2). Note the discrepancy between the studied soils, owing to the difference in the amplitude of θ , whereas in L₈₂₃, this amplitude reached 10 times (ranging from 0 to 0.226 dm³ dm⁻³) greater than that in R₇₃, i.e., from 0 to 0.022 dm³ dm⁻³ (Figure 3A). The upper and lower limits for θ_{FC} and θ_{PWP} remained until cBd was reached in this soil; in contrast, for L₈₂₃, the limits changed according to the increase in density, in which soil compaction triggered the replacement of the limits for θ_{AP} and θ_{PR} , respectively.

Additionally, as shown in Figure 3A, the increase in Bd caused an increase in the available water content in L₈₂₃, with the greatest LLWR range occurring at approximately 1.10 kg dm⁻³ (Figure 3B). From this point onwards, the increase in Bd caused the first change in the lower limit (θ_{PWP} to θ_{PR}), and since then, available water began to be restricted by mechanical impediment. This behaviour, however, did not manifest itself in R₇₃ in the absence of the maximum LLWR, resulting in only a linear reduction between iBd and cBd. Finally, R₇₃ had a cBd of 1.86 kg dm⁻³, and L₈₂₃ had a cBd of 1.26 kg dm⁻³ (Figure 3).

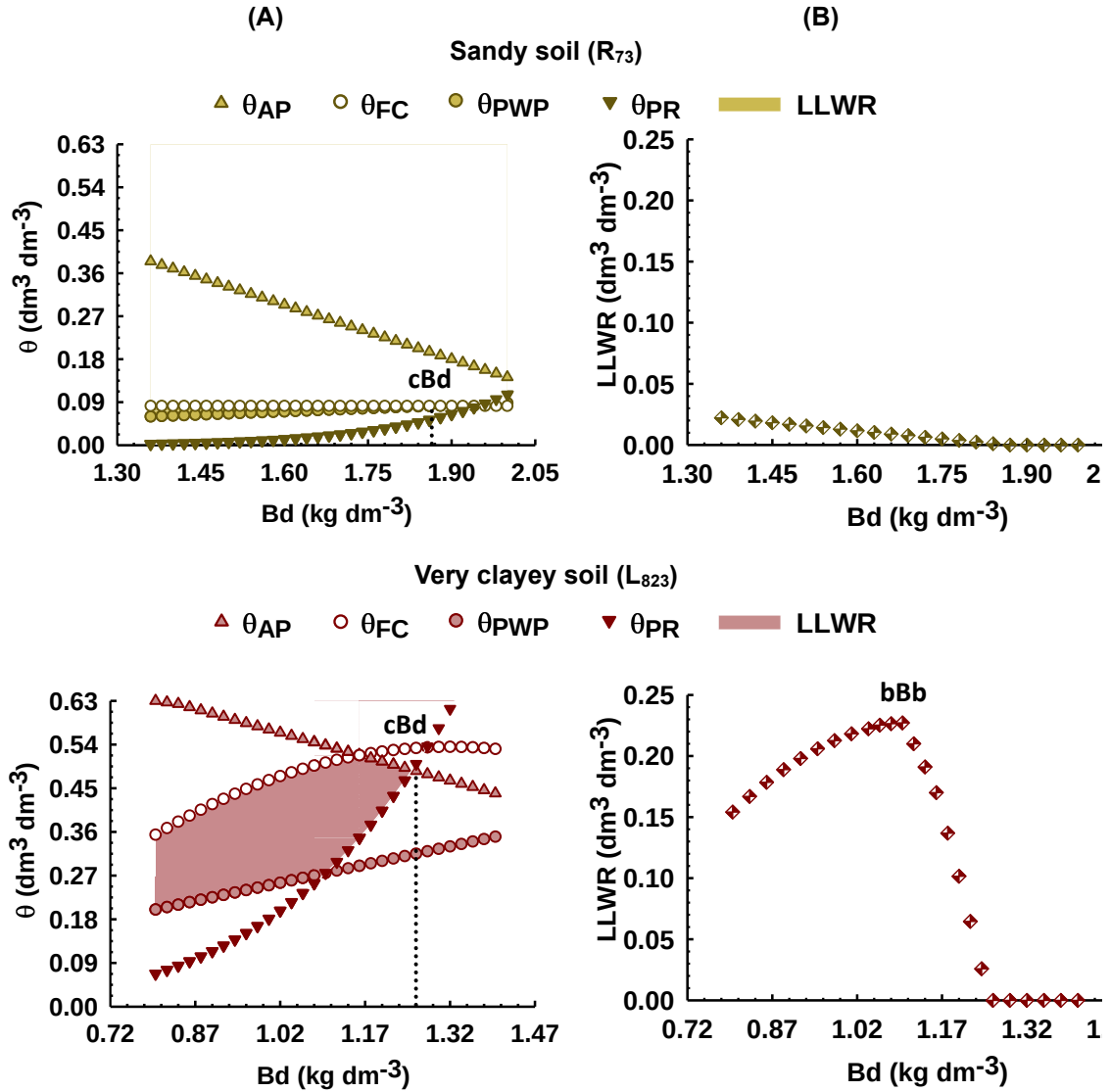


Figure 3. Variation in soil water content (θ) with bulk density (Bd) relative to the field capacity (θ_{FC} : $\psi_m = -0.006$ MPa), permanent wilting point (θ_{PWP} : $\psi_m = -1.5$ MPa), air porosity of $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{AP}) and soil penetration resistance of 2.5 MPa (θ_{PR}) (A), and least limiting water range (LLWR) (B) in sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils. bBd: beneficial bulk density to increase soil water retention; cBd: critical bulk density for plant development, corresponding to LLWR = 0. The subscribed number in the legend of the soils corresponds to the clay content (g kg^{-1}).

Notably, the cBd values are different in relation to the limiting macroporosity of the two studied soils (Figures 3 and 4). In R₇₃, the cBd value was lower than the lBd value, and conversely, for L₈₂₃, the cBd value was higher, reaching 1.19 kg dm^{-3} ; coincidentally, the second replacement of the limits of the LLWR occurred (θ_{AP} replaces θ_{FC} as an upper limit; Figure 3A), and the reduction in available water was further accentuated (Figure 3B).

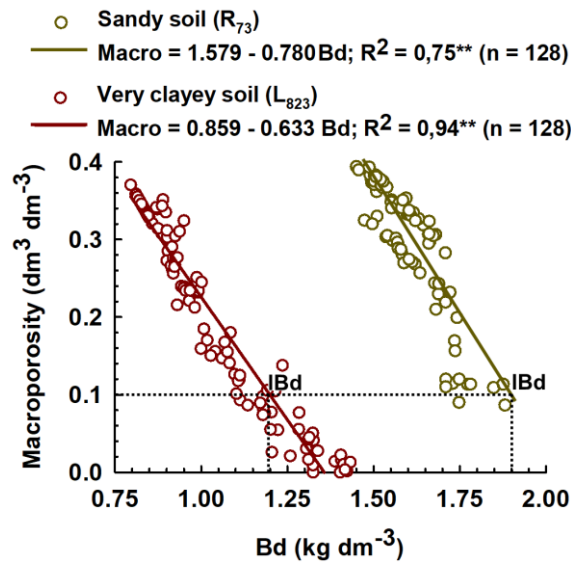


Figure 4. Macroporosity as a function of the increase in bulk density (Bd) on sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils. IBd: limiting bulk density for a reduction in macroporosity to 0.10 dm³ dm⁻³. The subscribed number in the legend of the soils corresponds to the clay content (g kg⁻¹).

Soil load-bearing capacity models based on additional compaction (σ_p), which is beneficial in terms of water retention (σ_b) and limits the reduction in soil macroporosity at 0.10 dm³ dm⁻³ (σ_l), are presented in Figure 5. The equations relating the state of compaction of each soil were prepared separately based on the significant differences between the regressions, according to the statistical procedures described by Snedecor & Cochran (1989). For R₇₃, it was not possible to adjust the regression that describes its resistance, as only at the lowest water contents in the evaluated soil ($\Psi_m < 6$ kPa) were the values within the evaluated load range (the maximum pressure applied in the study was lower than these compaction levels). Therefore, as the soil dries, it is necessary to apply a load greater than 1600 kPa to achieve the aforementioned structural conditions of the soil, and it is impossible to obtain the beneficial or critical conditions of compaction in this soil. Conversely, for L₈₂₃, in all the models (Figure 5), lower load-bearing capacity magnitudes at low matrix tensions are presented, which increase as the soil dries. However, the σ_p values were very low, highlighting its very high susceptibility to compaction.

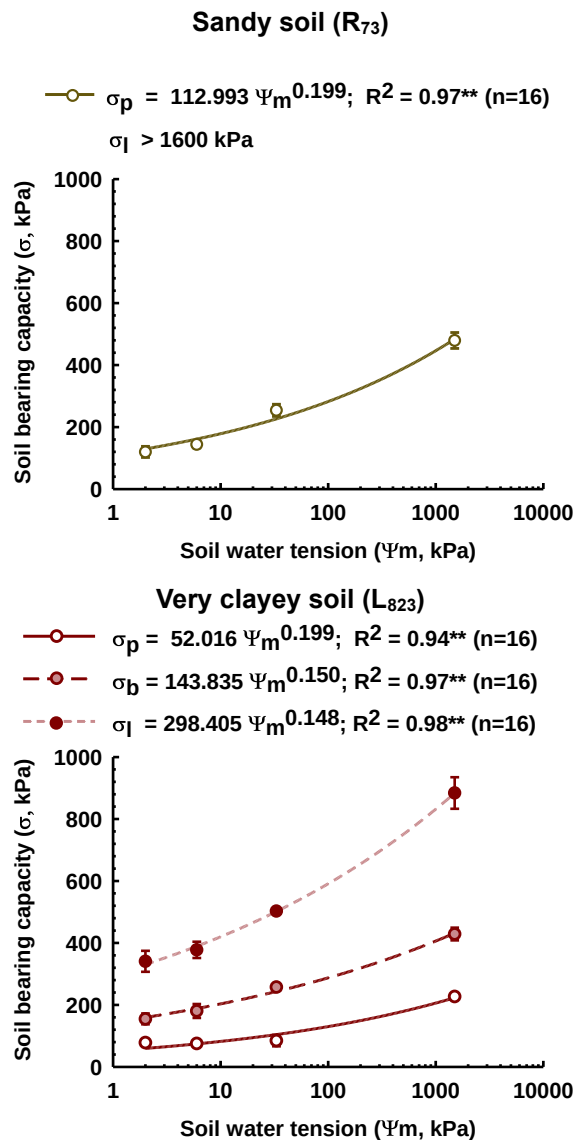


Figure 5. Load-bearing capacity models for additional compaction (σ_p), beneficial for water retention (σ_b) and limiting for reducing soil macroporosity at $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (σ_l) in sandy (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - R₇₃) and very clayey (Latossolo Vermelho Acriférrio típico - L₈₂₃) Brazilian tropical soils. $^{**}P < 0.01$. The subscribed number in the legend of the soils corresponds to the clay content (g kg^{-1}).

The particle size distributions of R₇₃ and L₈₂₃, along with those of the soils in Table 1, which were determined using the three dispersion methods, are presented in Figure 6. For soils with up to 450 g kg^{-1} clay (R₇₃, L₁₅₂, L₂₆₃, and L₃₉₉), the results were similar across the methods. In the more clayey soils, there was a clear differentiation in the quantification of silt and clay particles (for sand, similar results were obtained in all soils, regardless of the method used), with the most significant differences observed between the textural analysis methods. For L₈₂₃, 33% more clay content was detected using ultrasonic energy than using conventional methods (pipette and Bouyoucos).

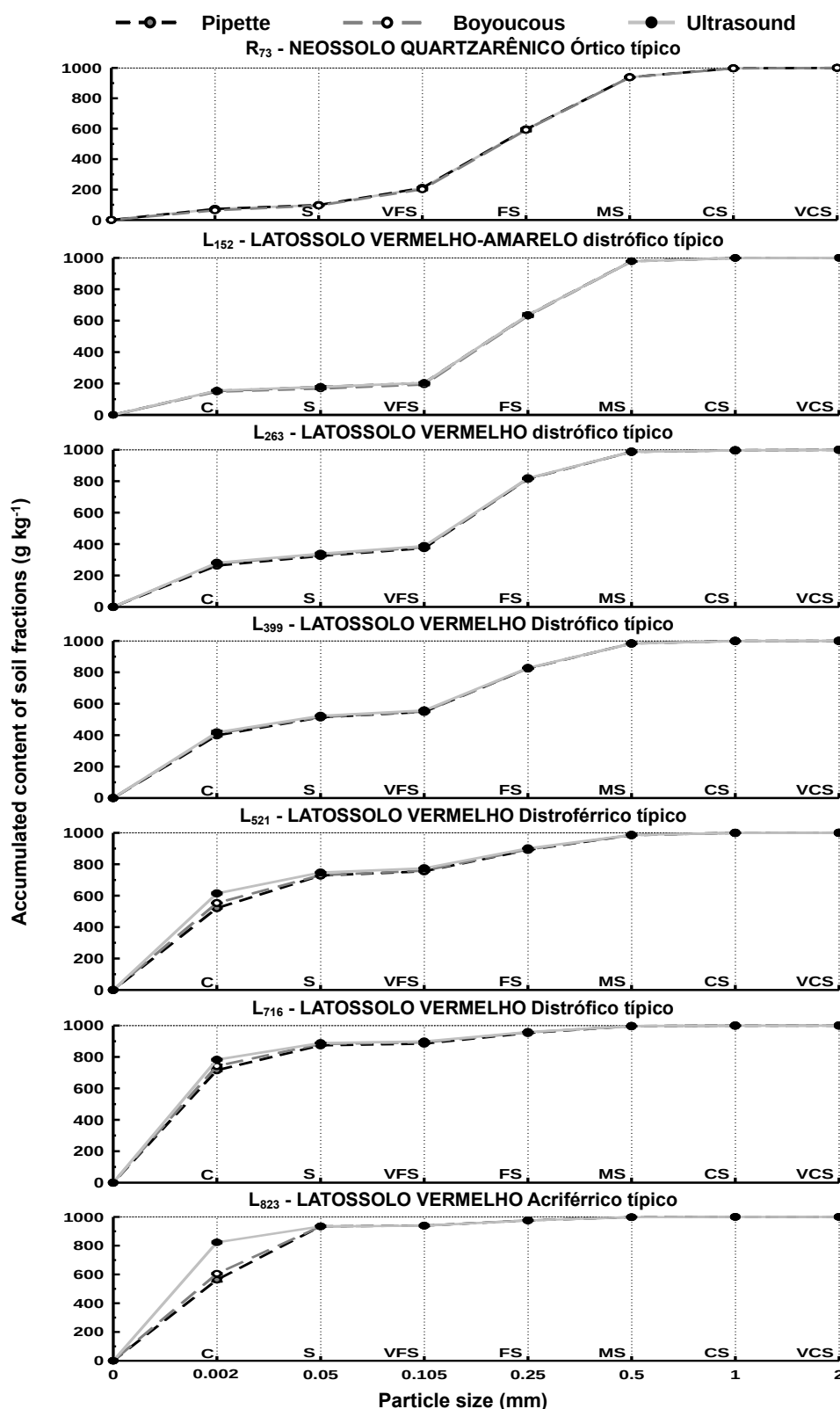


Figure 6. Distribution of particles by size in representative Brazilian tropical soils analysed using particle size methods. Pipette method: dispersion via rapid agitation for 20 minutes, sand particles quantified by screening, clay particles by pipetting and silt by difference; Bouyoucos method: dispersion via slow agitation for 16 hours, sand particles quantified by screening, clay particles by suspension density analysis with a hydrometer and silt by difference; Ultrasound method: dispersion via ultrasonic energy for 5 minutes, sand particles quantified by screening, clay particles by pipetting and silt by difference. VCS: very coarse sand; CS: coarse sand; MS: coarse sand; FS: fine sand; VFS: very fine sand. The number subscribed in the legend of the soils corresponds to the clay content (g kg⁻¹).

Figure 7 shows that the PTF resulting from the adjustments of Bd depends on the clay content determined by the pipette, Bouyoucos and ultrasound methods. The functions obtained in the latter demonstrate predictive improvements, as evidenced by the increase in R^2 values and $p < 0.01$. The use of this method also caused a reduction in the angular coefficients of the equations in relation to those of conventional methods, sufficient to increase the Bd values by approximately 20% under all four evaluated structural conditions and when the soils are more clayey.

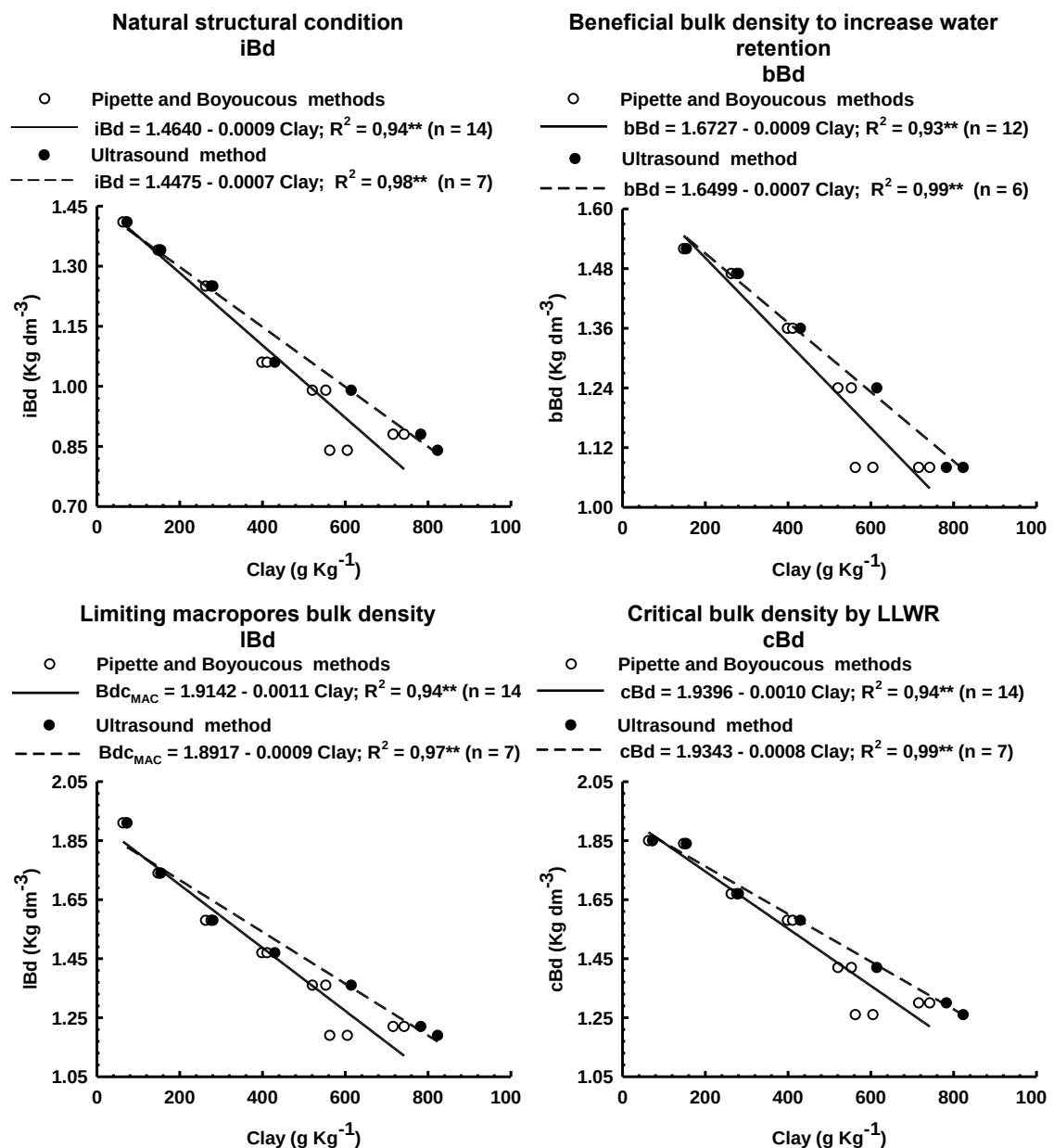


Figure 7. Bulk density under four structural conditions [iBd: initial bulk density for natural conditions; bBd: beneficial density to increase water retention; lBd: limiting bulk density for a reduction in macroporosity to $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$; cBd: critical density for plant growth and yield,

based on the least limiting water range (LLWR)], according to the clay content calculated using the pipette, Bouyoucos and ultrasound methods in Brazilian tropical soils.

Accounting for the adjustments to the equations determined using the ultrasonic clay content (Figure 7), Figure 8A shows the four structural conditions of the soil as a function of the TCS. The comparison of the regressions according to Snedecor & Cochran (1989) indicates differences related only to the linear coefficient of the regression equations (F-homogeneity test of the data, with $p < 0.05$; differences between inflections with $p > 0.05$, and differences between the adjusted means with $p < 0.01$), indicating that the increase in the clay fraction reduces the Ds value in a similar manner, regardless of the compaction state of the soil.

Additionally, the similar results for clay + silt across the three methods and the seven soils (Figure 6) also allowed for a statistical comparison of the PTFs of Bd as a function of the sum of textural fractions smaller than 0.05 mm. The methods did not differ from each other and, thus, could be grouped into a single equation for each structural condition of the soil (Figure 8B). Again, the differences between the functions were due only to the linear coefficients ($p < 0.01$ for differences between means adjusted with the pipette, Bouyoucos, and ultrasound methods).

An interpretative version for better understanding, as a diagnostic tool for soil compaction, can be found in the Supplementary Material (Anexo A).

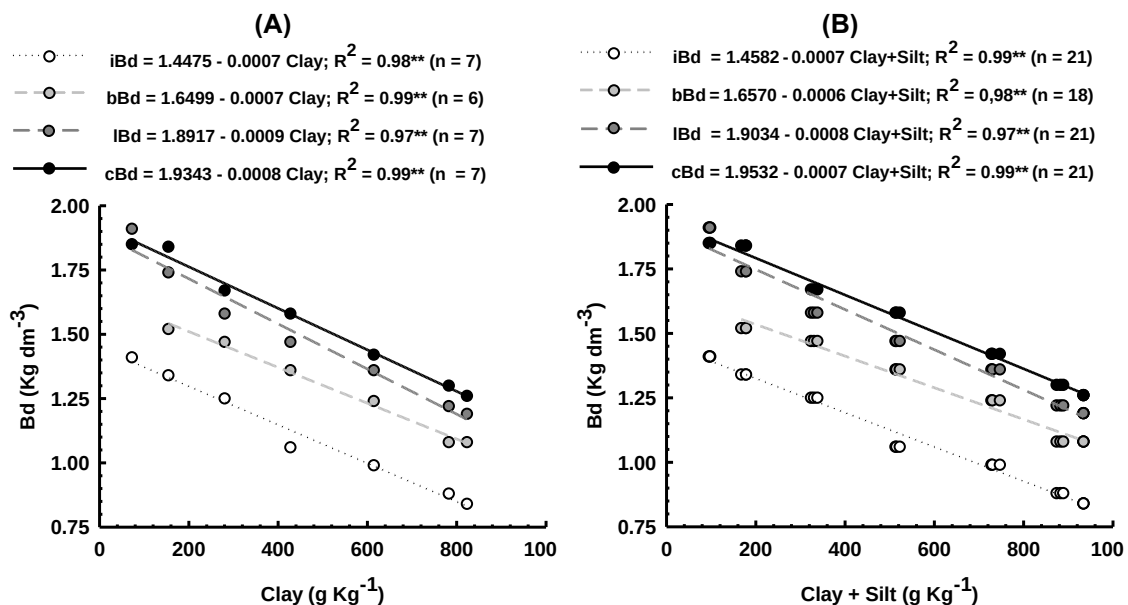


Figure 8. Initial bulk density (iBd), which is beneficial in terms of increasing water retention in the soil (bBd), is limiting due to the reduction in macroporosity at $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (lBd) and critical to plant growth and yield based on the least limiting water range (cBd) as a function of total clay in the soil extracted by ultrasonic dispersion (A) and due

to the clay plus silt content analysed by the pipette, Bouyoucos or ultrasound methods (B) in Brazilian tropical soils.

4. Discussion

4.1. Considerations regarding the mineralogy, texture and structure of soils

The Brazilian tropical soil of savanna (Cerrado) is among the oldest on Earth (Curi & Franzmeier, 1984; Marques et al., 2004). Conversely, Neossolos (Entisols) and Latossolos (Oxisols) are considered pedogenetically extreme on the weathering scale (USDA, 2014; Santos et al., 2018). In the Neossolos Quartzarênicos (Quartzipsamments), slow weathering was due exclusively to the high stability of quartz, which is the main primary mineral of the original rock. The chemical characterization of soil oxides via digestion in sulfuric extract is considered a standard procedure in Brazilian soils used to indicate the degree of soil weathering (Severiano et al., 2013; Santos et al., 2018) and to identify the mineralogical composition of the clay fraction (Curi & Franzmeier, 1984; Ferreira et al., 1999; Reatto et al., 2009). Because a Ki molecular ratio ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$) less than 2.0 is associated with highly weathered soils (Santos et al., 2018), both L_{823} (0.6) and even R_{73} (0.7) are considered highly weathered. Based on the kaolinitic ($K_r > 0.75$) or oxidic ($K_r \leq 0.75$) values for Latossolos, a value of 0.2 for the Bw horizons indicates that our soil is oxidic.

The chemical characterization of the oxides in the sulfuric extract, which describes the active weathering process of less resistant minerals, suggests that the poorer development of these sandy soils is exclusively due to the predominance of quartz in the soil matrix (very stable minerals in the sand fraction). The main factor that governs the formation of these soils in tropical environments is the source material; according to Curi & Franzmeier (1984) and Marques et al. (2004), the source materials are sandstones from the Bauru Formation in R_{73} and basalts originating from proportionally variable magmatic cover in L_{823} , and both of these materials are dated to the Pre-Cretaceous on geomorphic surfaces in Velhas. Thus, even to different degrees of pedogenetic evolution, Latossolos and Neossolos Quartzarênicos generally present a very simple mineralogy composed essentially of kaolinite (clay mineral 1:1), Fe and Al oxides (which includes oxides, hydroxides and oxy-hydroxides) in different proportions in the clay fraction and predominantly quartz in the sand fraction. Owing to the presence of recalcitrant organic molecules, they are endowed with high structural stability and friability under natural conditions (Moura et al., 2021).

Although genetically and taxonomically very distinct, the mineralogy assessed using the weathering indices discussed previously and the morphology evaluated in the field for the two studied soils are similar, with their behaviours being regulated primarily by the soil texture (Severiano et al., 2011b). The main differences, therefore, between the evaluated soils are as follows: 1. the distribution of particles by size (sandy and very clayey textures, respectively, for R₇₃ and L₈₂₃); and 2. in terms of micromorphology, in L₈₂₃, the distribution of grains in relation to the matrix follows an agglutinated pattern with interconnected cavities (Ferreira et al., 1999) and very small and very resistant granular aggregates with diameters between 50 and 300 µm (Vollant-Tuduri et al., 2005), with pores predominantly between micropeds (interaggregates) (Vitorino et al., 2003; Schaefer et al., 2004). A very small granular structure is typical of Latossolos, regardless of its textural class (Reatto et al., 2009; Severiano et al., 2013). Conversely, the very low clay content in R₇₃ limits the expression of structural units, presenting an arrangement mainly in the form of simple grains (without structural units).

However, these characteristics lead to the same morphology in the two soils: an in situ massive porous structure and, consequently, high porosity and water permeability (Ferreira et al., 1999; Cavalieri et al., 2009; Sales et al., 2010; Cherubin et al., 2016; Holthusen et al., 2018). Because they occur in association and are found in the same positions in the landscape (flat to gently undulating relief), their incorporation into the crop production process by farmers has been carried out indiscriminately on clayey soils. However, responses to management depend on the physical behaviour of water in the soil and, notably, result from structural changes caused by the adopted land use and management.

4.2. Modelling the least limiting water range and physical degradation of soils with contrasting textures

The LLWR of soils highlights the contrasting physical behaviour of water in soils due to the increase in Bd (Figure 3). This phenomenon results from compaction and causes degradation and/or affects the suitability of soil physical quality for agricultural production (Silva et al., 1994; Severiano et al., 2011a; Silva et al., 2014; Oliveira et al., 2019; Silva et al., 2019a; Tavanti et al., 2019; Silva et al., 2021) and is in agreement with observations reported by Severiano et al. (2011a), who modelled five other Latossolos in this study region that had clay contents ranging from 152– to 716 g kg⁻¹ (which are described in Table 1 and considered here as a reference for highly weathered soils). In

this scenario, R_{73} has the lowest water retention, whereas L_{823} has the highest water retention and is also the most clayey among the studied soils (Figure 6). They also represent the magnitude of plant-available soil water capacity in tropical soils, in which the increase in clay increases water retention but also leads to greater possible physical restrictions on crops, whether due to mechanical impediments or restrictions regarding aeration shortly after the occurrence of the first traffic operations (Silva et al., 2021).

The LLWR allows us to confirm that incorporating sandy soils in the rainfed production process demands caution, given the restricted range of θ and its reduction with increasing Bd (Figure 3). Similar results were reported by Amorim et al. (2022) in a study of soil water retention and availability in the Neossolo Quartzarênico from central-western Brazil and are explained by the textural composition, which is mainly sandy/quartz (particles > 0.05 mm), thus providing very low water retention capacity (USDA, 2014; Sales et al., 2010; Santos et al. 2018). It was also not possible to mathematically adjust the SWR_{FC} , and no effect of this soil structure on water relationships occurred, which is related to its lack of clay. Thus, with no beneficial effect of slight compaction (no increase in the LLWR), as reported by Severiano et al. (2011a) for Latossolos, even in those soils with predominantly sand, it is not possible to assign a bBd value because of the diminishing effect due to the increase in Bd (Figure 3B). Furthermore, changes due to the PRC are more discrete than those due to L_{823} (lower values of F and R^2 ; Table 2), which allows us to verify that clayey soil is more responsive to impacts on the structure, whereas medium-textured and sandy Neossolos tend to have greater structural stability.

The LLWR of R_{73} is consistent with that reported by Oliveira et al. (2019), who studied a soil with approximately 20% clay cultivated with sugarcane and cover crops and reported a low θ and a critical bulk density of 1.80 kg dm^{-3} , which are close to those reported in our study (1.86 kg dm^{-3} and more sandy). Another relevant and documented aspect is that cBd is lower than Bd , which is necessary for θ_{AP} and θ_{PR} to reach critical values for plant development (Figure 3A), which reinforces the absence and weaker significance of the adjustment coefficients, SWR_{FC} and PRC. This limitation is fundamentally related to water retention and availability to plants and is less affected by structural changes resulting from compaction because the coarse texture generates high friction between the particles and less rearrangement in response to exposure to external loads applied to the surface (Cho et al., 2006), especially compared with clayey or very clayey Latossolos in this region (Ajayi et al., 2009; Severiano et al., 2013).

Although very limited, technological innovations implemented in recent years have encouraged Brazilian rural producers to incorporate sandy soils into rainfed agriculture, mostly in terms of annual grain production (Caetano et al., 2013; Donagemma et al., 2016; Amorim et al., 2022). Success depends on the use of specific cultivars and, mainly, the adoption of conservation agriculture practices, notably the use of cover crops to maintain permanently cultivated soil (Muniz et al., 2021), as well as adequate production of mulch biomass for succession crops (Silva et al., 2021) and even the recovery of physically degraded soils [highlighting grasses of the genus *Brachiaria* sp., according to Silva et al. (2019a)]. Additionally, more sustainable management systems that increase water retention, such as direct planting and crop-livestock-forest integration, which are undoubtedly the most suitable and balance the water and air contents in the soil, have become indispensable for the development of agricultural activities in these soils (Oliveira et al., 2019; Dlapa et al., 2020). This decision would also mitigate the risks of water erosion (given the extremely high vulnerability, including gullying) and ensure agricultural sustainability (Sales et al., 2010).

The agricultural preference for clayey Latossolos was initially due to its chemical and physical attributes favourable for plant growth and its high productive potential. Figure 3 shows that initially (until bBd was reached), the θ_{FC} and θ_{PWP} were, respectively, the upper and lower limits and provided ideal conditions for the growth and development of root functions [i.e., available soil water capacity $> 0.2 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, according to the classification by Reynolds et al. (2009); in this study, R_{73} is considered poor or dry soil]. A study carried out by Martinez & Souza (2020) emphasized that the clay fraction and the granular micromorphology of the Brazilian Latossolos determine aggregation and considerable microporosity, although there may be reduced mesoporosity [pores with sizes between 2.9 and 50 μm , according to Silva et al. (2014)], which is the functional part of soil porosity that is effectively responsible for water availability (Carducci et al., 2011). Given its high clay content, this soil can provide crops with full water availability as long as its structure is preserved.

For this reason, it is essential to define the values of physical reference attributes related to soil use and management responses. Previous studies have confirmed that slight compaction increases the water availability of oxidic and highly weathered soils by partially transforming excessively large pores into mesopores (Carducci et al., 2013), and in our study, 47% of the LLWR of the soil in question (Figure 3B) was associated with bBd (1.08 kg dm^{-3}). Confirmation of the beneficial agronomic effect on tropical soil was

demonstrated by Silva et al. (2021), who refined the use of the LLWR for sunflower (*Helianthus annuus*) and paiaguas grass (*Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás) crops; additionally, they reported different sensitivities of species to the soil environment and quantified the occurrence of beneficial compaction.

From the compression level at which bBd was configured, there is a limitation of θ_{PWP} by θ_{PR} , and any increase in Bd reduces the LLWR of L_{823} to cBd at 1.26 kg dm^{-3} , where it becomes null (Figure 3A). Therefore, due to physical degradation, the loss of productive potential is very common in clayey Latossolos; this loss is initially caused by the increase in penetration resistance (as shown in Figure 3 for bBd), whereas aeration becomes limiting only at high levels of compaction. Our results are in agreement with those of Tavanti et al. (2019), who evaluated crop-livestock integration systems implemented in a Brazilian Latossolo. They reported that the destruction of macropores caused by the physical degradation of the soil led to a reduction in the LLWR (the increase in soil resistance to penetration constituted the primary factor of physical–water restriction).

Structural changes in soil resulting from a reduction in macroporosity (Figure 4) impact all pore size distributions (Carducci et al., 2013; Oliveira et al., 2019) and raise concerns related to the crucial role of environmental processes regulated by the soil, with emphasis on water infiltration and underground recharge (Holthusen et al., 2018). Owing to its sandy texture, the high values of R_{73} make it incapable of having limited edaphic functions before the LLWR becomes null. This is because the lBd value (1.91 kg dm^{-3}), in which the macroporosity becomes limiting [$0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, according to the propositions of Baver (1949), Vomocil & Flocker (1966), Grable & Siemer (1968) and Gupta & Allmaras (1987), is greater than the cBd value and reinforces water availability as the main limitation, as opposed to aspects linked to porosity. In turn, in L_{823} , the Bd value, where the LLWR becomes null (1.26 kg dm^{-3} ; Figure 3), is greater than that where the soil macroporosity reaches $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (1.19 kg dm^{-3} ; Figure 4) and therefore is in a greater state of soil compaction. In addition, Severiano et al. (2011a) suggested that, in the latter case, drainable porosity may already be compromised, and the lowest compressive state of lBd was also reported by Reichert et al. (2009), which allows us to state that the hydrological properties of the soil are affected before soil compaction completely restricts crop growth and yield.

In the appropriate structural arrangement, 50% of the pores [17 to 25% of the macropores ($> 50 \mu\text{m}$) and 25 to 33% of the micropores ($< 50 \mu\text{m}$)] and, consequently,

50% of the volume of solids (between minerals and organic particles) are present in the soil (Hillel, 1982). However, naturally, the evaluated soils present similar and high macroporosity values (approximately $0.40 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$; Figure 4), which was already highlighted by Severiano et al. (2011a) when the ecological role of soils in the Brazilian Cerrado was recognized, due to their significant porosity and their role in the formation of the main hydrographic basins in South America. However, our results elucidate that the relationship between mass and volume depends on the soil texture and, in R_{73} , that low water retention porosity and excessive aeration occur, as indicated by the critical limits of the LLWR.

With management intervention, however, the solid phase in these sandy soils can occupy approximately 80% of the total volume without completely limiting aeration while maintaining the soil macroporosity at $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$. The focus is on water availability because, under the best conditions, the field capacity did not exceed 10% of the total volume (Figure 3). In turn, L_{823} , even when compression became limiting (cBd), still had more than 50% of its volume in the porous phase (with a predominance of the liquid phase of the soil). Owing to the conflicting situation, the use of porosity reflects all the structural changes in the soils promoted by use and management and is in agreement with the findings of Peixoto et al. (2022). These authors used the machine learning technique as a tool for diagnosing soil compaction and reported that the most important variables used to predict impacts were crop yield and soil porosity (macroporosity, total, microporosity and aeration capacity). This behaviour also corroborates the considerations of Reynolds et al. (2009) concerning the immediate responses to their use and management of the soil pore space. Thus, we consider the minimum macroporosity of $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ as a limiting criterion (Vomocil & Flocker, 1966).

4.3. Compressive behaviour of soils

Load-bearing capacity models are evaluated and characterized here in terms of their compressive behaviour when incorporated into the production process. When considering the preconsolidation pressure (σ_p) as the maximum pressure to be applied to avoid further compaction, the higher resistance of R_{73} and the greater susceptibility to compaction of L_{823} are denoted (Figure 5). These results are also consistent with those reported by Severiano et al. (2013), who related compressive behaviour to soil water retention and texture characteristics of ten oxidic Latossolos that were representative of the oldest soils in the world. These authors reported that resistance increases with soil

drying and that susceptibility is proportional to the clay content, which is considered a particular characteristic of these soils because of their very small granular microstructure, which results in high porosity regardless of the textural class.

These results are relevant because they quantify the consequences of applying pressure to soils with inappropriate water contents. Note the strong influence of the soil water potential (ψ_m), the results of which corroborate those reported by Imhoff et al. (2004), Saffih-Hdadi et al. (2009) and Esteban et al. (2020). When pressure values that are used in Brazilian agriculture are between 200 and 450 kPa [for example, ranges of approximately 190-360 kPa for tractors, 270-450 kPa for sprayers and 320-360 kPa for harvesters, according to Severiano et al. (2013)], and two annual harvests occur in the rainy months (October-March), it is expected that soil compaction in L₈₂₃ will be widespread during traffic regardless of the soil water content, as the applied pressures will exceed those that can be supported. Thus, our results reinforce the observations that Brazilian Latossolos are the most susceptible soils in the world and that their degradation is inevitable. Indeed, soil compaction is pervasive throughout all agricultural regions of the country, potentially occurring at magnitudes significantly greater than those reported in other parts of the world (Schjønning et al., 2015; Botta et al., 2018; Peixoto et al., 2020). In addition, and based on this information, and even with the greater load-bearing capacity of the soil, some additional compaction is also expected for R₇₃ because the applied loads also exceed the σ_p of the soil in question, particularly when it is moist.

This is the main agroenvironmental problem of these soils (Ajayi et al., 2009; Silva et al., 2021; Peixoto et al., 2022), given their extremely high susceptibility. However, Severiano et al. (2011b), when evaluating the compressive behaviour of the soils described in Table 1, assumed that additional compaction (i.e., plastic deformations caused by pressures applied in the region of the soil's virgin compression curve) is not always harmful as long as it does not compromise the edaphic functions of the soil and may even be beneficial, as outlined in the discussion of Figure 3. Based on the soil compression curve, the authors proposed determining the beneficial pressure (σ_b) to increase water retention in the soil and the limiting pressure (σ_l) for edaphic functions, thereby reducing the macroporosity to 0.10 dm³ dm⁻³.

Figure 5 also shows the load-bearing capacity of the soils under these two structural conditions. We note that for R₇₃, it was not possible to model them because of the lack of beneficial compaction (Figure 3) and because σ_l was probably only achieved at applied pressures higher than the maximum value reached (or even never reached) in

the uniaxial compression test (1600 kPa), which is a behaviour that has also been observed in a Latossolo with 152 g kg⁻¹ clay (Severiano et al., 2011b). These results confirm that soil compaction is not a problem in the sandy soils of tropical regions and that management plays a key role in improving soil-water relationships. In contrast, L₈₂₃ is highly susceptible to compaction, even under σ_b , and can be easily overcome by external pressures, such as traffic (which can also result from animal trampling). Tropical clayey soils lack effective management strategies to mitigate their high compressibility because, even when applied pressures remain below the critical threshold for reducing soil macroporosity (σ_1), compaction can still occur (Figure 5).

4.4. Improvements to pedotransfer functions

The quantification of the iBd, bBd, cBd and lBd of the two soils by compaction modelling encouraged us to update the PTF proposed by Severiano et al. (2011a), which now extends the predictive capacity to the clay limits modelled here (Figure 6). These functions have been used successfully by Linhares et al. (2020), Silva et al. (2021), Lima et al. (2023) and Nascimento Junior et al. (2023) in tropical soils with loam or clayey textures but will now probably cover all those used for agricultural purposes in Brazil and with the potential to be assessed in tropical soils worldwide. Similar to previous research, the curves were adjusted to a linear model (Figure 7), reinforcing that the physical behaviour of water in R₇₃ is compatible with Latossolos, depending on the in situ morphology and massive porous appearance but mainly the distribution of particle sizes.

However, when the pipette textural method was used to characterize L₈₂₃ [which is considered standard for Brazilian soils, according to Teixeira et al. (2017)], the results intrigued us because it presented very low sand contents but contradictorily high relative silt contents [the silt/clay ratio, which, according to Santos et al. (2018), is lower than 0.6, was not found; Figure 1]. This fraction is characterized by high instability during the genesis of Brazilian Latossolos, which is incompatible with their degree of weathering. Therefore, the expectation that only the youngest soils have a high silt content is agreed upon and universal; however, this agreement does not apply to the studied Neossolo for the reasons discussed previously (the parent material of these soils has the same geological age, and the delay in weathering of R₇₃ was due to the resistance of the quartz).

Furthermore, the reference values for the structural conditions of L₈₂₃ (iBd = 0.84 kg dm⁻³; bBd = 1.08 kg dm⁻³; lBd = 1.19 kg dm⁻³ and; cBd = 1.26 kg dm⁻³) were very low for a Latossolo with 563 g kg⁻¹ of clay and even incompatible with others already

quantified in the literature, with more than 600 g kg^{-1} (Reichert et al., 2009; Severiano et al., 2011a, b). In this sense, Vitorino et al. (2003) reported that soils with a relatively high degree of weathering present clay microstructures that are resistant to dispersion; this behaviour was also quantified by Marcelino et al. (2018) and Barbosa et al. (2021). These researchers suggested that in more weathered soils with higher levels of Fe and Al oxides, the silt fraction is increased by the presence of pseudosilt (clay microaggregates). Finally, we consider that the dispersion efficiency of Latossolos is influenced by both the presence of these cementing agents and analytical dispersion procedures.

Given that texture is one of the most reliable characteristics, as well as its importance in classifying the soil overall (i.e., classification, interpretation, recommendation), it is therefore necessary to correctly quantify the distribution of particles in terms of their size and, given this inconsistency, investigate the efficiency of analytical methods and their applications in assessing structural changes in soil. We included the calibrated Bouyoucos method (Bouyoucos, 1951), as it is a routine procedure and would enable the wide application of our results in land use planning; in addition, we evaluated the dispersion using ultrasonic energy, which is considered to provide the greatest dispersion of soil materials (Silva et al., 2020) because the cavitation phenomenon releases energy through waves capable of disrupting even highly aggregated soils formed by oxides (Mayer et al., 2002; Taurozzi et al., 2010; Ribeiro et al., 2017), thereby promoting its dispersion in an integral manner (Schmidt et al., 1999; Sá et al., 2002; Ribeiro et al., 2017; Silva et al., 2019b).

Figure 6 makes this problem explicit in clayey Latossolos (notably in L₅₂₁, L₇₁₆ and L₈₂₃, which are also the most weathered, with $K_r = 0.4$ and 0.7 and 0.2 , respectively), by revealing the highest total clay contents but also demonstrating that the pipette and Bouyoucos methods, although less efficient, behave similarly. Thus, the results of texture determination methods influenced the adjustment of the PTF for the four structural conditions (Figure 7); the use of traditional textural methods led to the gradual underestimation of B_d reference values as a function of the increase in the clay content (the differences are not important in sandy loam or thicker soils but can reach a 25% increase in diagnostic accuracy in these soils, which are very clayey in texture). In this case, the underestimation was 19% for L₈₂₃.

By applying the results of the total soil clay content obtained by sonification, we found that the main differences between the PTFs are due to the increase in the linear coefficient between the equations (the differences are fundamentally related to the

ordinate axis) (Figure 8A). It is thus observed that beneficial compaction (bBd) corresponds to an increase of approximately 15% of the initial bulk density (iBd), 30% lBd and a 33% in cBd. The concern about the correct physical characterization of the soil for the purpose of diagnosing soil compaction becomes explicit here; regarding this concern, the underestimation of the Bd due to the textural assessment method (up to 19%) can exceed the increase necessary to change the structural condition (approximately 15%), leading to a false diagnosis.

The PTFs (Figure 8A) are similar to those of Reichert et al. (2009) for reference values of Brazilian soils belonging to various taxonomic classes from subtropical regions. Therefore, PTFs can be considered an alternative for determining the maximum standard Proctor bulk density for determining the critical degree of compactness [according to Reichert et al. (2009), a uniaxial load greater than 800 or 1600 kPa is promising for determining the reference bulk density (RefBd) for no-tillage soils with a high clay content or low clay content, respectively, because of the elastic properties of the soil and, in this case, clay]; however, they still have the possibility of defining relative density values (by the ratio between the bulk density and some RefBd values) to measure the impact of soil use and management (when considering, for example, lBd as a reference value) or the degree of compaction beneficial for plant growth [Silva et al. (2021) used bBd as RefBd]. Thus, it becomes possible to compare the results of soils with contrasting textures at the same scale.

Considering the analytical refinement used in this study and the fact that ultrasonography in soils is a technique that is not widely used in conventional analysis and is still needed in scientific studies, the efficiency of the three analytical procedures evaluated for extracting sand from the soil (Figure 6) makes it feasible to apply the results for understanding the effect of management on the soil structure because farmers, technicians and researchers already have access to textural analyses carried out in service provider laboratories. The clay and silt contents in all the soils were similar, and this can be considered a boundary condition for the applicability of the methods. As shown in Figure 8B, we then adjusted the same functions by the sum of textural fractions smaller than 0.05 mm, and because we found no differences between the three methods (Snedecor & Cochran, 1989), they were grouped into a single equation around each structural condition. The behaviour of these regressions was very consistent with those previously obtained only for the TCS using ultrasound (Figure 8A) and with increments of 14% for bBd, 31% for lBd and 34% for cBd in relation to the iBd. However, Reichert et al. (2009),

upon evaluating equations for estimating the RefBd based on the contents of clay or clay plus silt in subtropical soils of Brazil, reported greater precision (a higher coefficient of determination) of the adjustments that depended only on the clay content. Therefore, it is essential to consider whether the silt fraction of the soil actually corresponds to intermediate particles between sand and clay (between 0.05 and 0.002 mm, such as those found in soils evaluated by these authors) or undispersed soil microaggregates in the analysis of the particle size (i.e., pseudosilt, which is evaluated here), which are commonly found in highly weathered Latossolos from central Brazil (Vitorino et al., 2003; Marcelino et al., 2018; Barbosa et al., 2021).

We consider this refinement an advance because the analytical results are related to methodological procedures, and correctly quantifying the distribution of particles in terms of size is essential for measuring the effects of management and the adequacy of agricultural practices. The standard methodologies currently adopted in Brazil are adaptations of procedures developed for soils in temperate regions (Bouyoucos, 1951; Gee & Bauder, 1986; Teixeira et al., 2017; Silva et al., 2020); together with a correct joint analysis of our results, it is possible to verify that the occurrence of pseudosilt is merely descriptive and not functional (all our results indicate the behaviour of very weathered soils and, therefore, soils that are poor in silt). Thus, its use can be bypassed using the sum of the clay and silt fractions, given the highly weathered residual silt concentration in Latossolos.

5. Conclusions

The physical behaviour of tropical soils is governed by the size distribution of the particles. In sandy soils, the very low available water constitutes the main limitation, whereas susceptibility to compaction increases proportionally with increasing clay content. This is an inevitable problem due to the high susceptibility of the soils, and even common mitigation practices, such as trafficking soils at lower water contents, will not protect the soils from reductions in their edaphic functions.

The success of modelling soil compaction using pedotransfer functions under any structural conditions (from natural conditions to physical degradation) depends on the soil texture and its accurate characterization. To achieve this, it is necessary to quantify the total clay content. As a boundary condition, the sum of textural fractions smaller than 0.05 mm, given the presence of pseudosilt in highly weathered tropical soils, is merely descriptive and neither contributes to nor regulates their physical behavior.

6. Acknowledgements

The authors thank the IF Goiano (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano) and the Laboratório de Física do Solo/IF Goiano, Dra. Carla Eloize Carducci and the Laboratório de Física do Solo/FCA/UFGD (Universidade Federal da Grande Dourados) for supporting our research.

7. References

- Ajayi, A. E., Dias Junior, M. S., Curi, N., Gontijo, I., Araujo Junior, C. F. & Inda Junior, A. V., 2009. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian Latosols. *Soil Tillage Res.* 102, 14–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.013>
- Amorim, R. S. S., Albuquerque, J. A., Couto, E. G., Kunz, M., Rodrigues, M. F., Silva, L. D. C. M. & Reichert, J. M., 2022. Water retention and availability in Brazilian Cerrado (neotropical savanna) soils under agricultural use: Pedotransfer functions and decision trees. *Soil Tillage Res.* 224, 105485. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105485>
- Barbosa, S. M., Carducci, C. E., Serafim, M. E., Zeviani, W. M., Albach, B., Castro, E. M. & Oliveira, G. C. 2021. Using ultrasonic and microwave devices to dry and disperse soils with high Fe₂O₃ content from Brazil. *Geoderma Reg.* 26, e00419. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00419>
- Baver, L.D. 1949. Practical values from physical analyses of soils. *Soil Sci.* 68, 1-14.
- Botta, G.F., Becerra, A.T., Bienvenido, F., Contessotto, E.E., 2018. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) harvest: Tractor and grain chaser traffic effects on soil compaction and crop yields. *Land Degrad Dev.* 4252–4261. <https://doi.org/10.1002/ldr.3181>
- Bouyoucos, G. H. 1951. A recalibration of the hydrometer for making mechanical analysis of soils. *Agron J.* 43, 434-438.
- Busscher, W. J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, 33, 519-524.
- Caetano, J. O., Benites, V. M., Silva, G. P., Silva, I. R., Assis, R. L. & Cargnelutti Filho, A. 2013. Dynamics of organic matter of a sandy soil under cerrado turned into cropland converted to soybean and millet succession. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 1245-1255. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500014>

- Carducci, C. E., Oliveira, G. C., Severiano, E. C. & Zeviani, W. M. 2011. Modeling the water retention curve in Oxisols using the Double Van Genuchten Equation. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 35, 77-86.
- Carducci, C. E., Oliveira, G. C., Zeviani, W. M., Lima, V. M. P. & Serafim, M. E. 2013. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. *Eng. Agric.* 33, 291-302. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>
- Cavaliere, K. M. V., Silva, A. P., Tormena, C. A., Leão, T. P., Dexter, A. R. & Håkansson, I. 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a rhodic ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil Tillage Res.* 103, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.014>
- Centurion, J.F., Freddi, O.S., Aratani, R.G., Metzner, A.F.M., Beutler, A.N. & Andrioli, I. 2007. Influence of sugarcane cultivation and clay mineralogy in physical properties of rhodic oxisols. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 31, 199-209. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200002>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Cerri, C. E. P., Davies, C. A. & Cerri, C. C. 2016. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- Cho, G.C., Dodds, J. & Santamarina, J.C., 2006. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 132, 591-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591))
- Curi, N. & Franzmeier, D. 1984. Toposequence of oxisols from the central plateau of Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, p. 341-346. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020024x>
- Dlapa, P., Hrinik, D., Hrabovský, A., Šimkovic, I., Žarnovičan, H., Sekucia, F. & Kollar, J., 2020. The Impact of land-use on the hierarchical pore size distribution and water retention properties in loamy soils. *Water* 12, 339. <https://doi.org/10.3390/w12020339>
- Donagemma, G. K., Freitas, P. L., Balieiro, F. C., Fontana, A., Spera, S. T., Lumbreras, J. F., Viana, J. H. M., Araújo Filho, J. C., Santos, F. C., Albuquerque, M. R., Macedo, M. C. M., Teixeira, P. C., Amaral, A. J., Bortolon, E. & Bortolon, L., 2016. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of

- light soils in Brazil. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 51, 1003–1020.
<https://doi.org/10.1590/S0100-204x2016000900001>
- Esteban, D. A. A., Souza, Z. M., Silva, R. B., Souza Lima, E., Lovera, L. H. & de Oliveira, I. N., 2020. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma*, 362, 114097. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. The statistic division – FAOSTAT. Paris: FAO, 2022.
- Ferreira, M. M., Fernandes, B. & Curi, N., 1999. Mineralogy of clay fraction and structure of Latosols (Oxisols) from southeastern Brazil. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 23, 507-514. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>
- Gee, G.W. & Bauder, J.W. Particle-size analysis. In: *Methods of soil analysis. Part 1*, 2nd ed., Madison, American society of Agronomy, 1986. pp 383-411.
- Grable, A.R. & Siemer, E.G. 1968. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, 180–186.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x>
- Gupta, S.C. & Allmaras, R.R., 1987. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6, 65-100. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_2
- Hillel, D. *Introduction to soil physics*. San Diego, CA, Academic Press, Inc. 1982, 364p.
- Holthusen, D., Brandt, A. A., Reichert, J. M. & Horn, R. 2018. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. *Soil Tillage Res.* 177, 113-124.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.003>
- Imhoff, S., Silva, A. P. & Fallow, D. 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 17-24.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1700>
- IUSS Working Group WRB (2006) *World reference base for soil resources 2006*. 2nd edn, World Soil Resources Report No. 103. (FAO: Rome)
- Kiehl, E. J. 1979. *Manual de edafologia*. São Paulo: Ceres, 262 p.

- 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. 2023. Crop-livestock integration improves physical soil, agronomic and environmental aspects in soybean cultivation. *Plants* 12, 3746. <https://doi.org/10.3390/plants12213746>
- Linhares, A.J.S., Gonçalves, W.G., Cabral, S.M., Brito, M.F., Brandstetter, E.V., Silva, J.F.G., Costa, K.A.P., Souza, W.F. & Severiano, E.C. 2020. Soil compaction affects sunflower and *Paiaguas* palisadegrass forage productivity in the Brazilian savanna. *Aust. J. Crop Sci.* 14, 1131–1139. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.07.p2305>.
- Lopes, A. S. & Guilherme, L. R. G. 2016. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. *Adv. Agron.* 137, 1-72. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- Marcelino, V., Schaefer, C. E. & Stoops, G. 2018. Oxic and related materials. In *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier. 663-689. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00023-1>
- Marques, J. J.; Schulze, D. G.; Curi, N. & Mertzman, S.A. 2004. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian cerrado soils. *Geoderma*, v. 119, n. 3/4, p. 179-195. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00260-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00260-X)
- Martinez, P. & Souza, I.F. 2020. Genesis of pseudo-sand structure in oxisols from Brazil - a review. *Geoderma Reg.* 22, e00292. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00292>
- Mayer, H., Mentler, A., Papakyriacou, M., Rampazzo, N., Marxer, Y. & Blum, W.E.H. 2002. Influence of vibration amplitude on the ultrasonic dispersion of soils. *Int. Agrophys.* 16, 53-60.
- Mello, D. C., Veloso, G. V., Mello, M. F., Lana, M. G., Oliveira, I. A., Mello, F. A. O. & Demattê, J. A. M. 2025. Integrating proximal geophysical sensing and machine learning for digital soil mapping: Spatial prediction and model evaluation using a small dataset. *Soil Advances*, v. 3, p. 100024. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100024>
- Moura, M. S., Silva, B. M., Mota, P. K., Borghi, E., de Resende, A. V., 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, 106523.
<https://doi.org/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., Vilela, L., Lana, M. A., Leandro, W. M. & Dias, M. B. C. 2021. Soybean yield in integrated crop-livestock system in comparison to soybean-maize succession system. J. Agric. Sci, 1, 1-11.
<https://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. 2023. Modeling and quantification of soil compaction promoted by animal trampling in an integrated crop-livestock system. Semina 44, 1179-1196. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n3p1179>
- Oliveira, G.C., Dias Junior, M.S., Resck, D.V.S. & Curi, N. 2003. Structural changes and compressive behavior of a dystrophic clayey Red Latosol under different use and management systems. Pesq. Agropec. Bras. 38, 291-299.
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200017>
- Oliveira, G.C., Severiano, E.C. & Mello, C.R. Penetration resistance dynamics of a Dark Red Latosol of Microregion of Goiania, State of Goias, Brazil, GO. 2007. Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient. 11, 265-270. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300004>
- Oliveira, I. N., Souza, Z. M., Lovera, L. H., Vieira F. C. V., Lima, E. S.; Esteban, D. A. A. & Fracarolli, J. A. 2019. Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. Agric. Water Manag. 225, 105777.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105777>
- 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 Res. 194, 104307.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- 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. 2020. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. Sci Total Environ. 745, 140887.
<https://doi.org/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. 2022. Machine learning as a useful tool for diagnosis of soil compaction under continuous no-tillage in Brazil. *Soil Res.* 61, 145-158. <https://doi.org/10.1071/SR22048>
- Rajão, R., Soares Filho, B., Nunes, F., Börner, J., Machado, L., Machado, D., Oliveira, A., Pinto, L., Ribeiro, V., Rausch, L., Gibbs, H. & Figueira, D. 2020. The rotten apples of Brazil's agribusiness. *Science*, v. 369, p. 246-248.
- Reatto, A., Bruand, A., Martins, E. S., Muller, F., Silva, E. M., Carvalho Júnior, O. A., Brossard, M. & Richard, G. 2009. Development and origin of the microgranular structure in latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. *Catena* 76, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.003>
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R. & I. Håkansson. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102, 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Reis, J. C., Rodrigues, G. S., Barros, I., Ribeiro Rodrigues, R., A., Garrett, R. D., Valentim, J. F., Kamoi, M. Y. T., Michetti, M., Wruck, F. J., Rodrigues-Filho, S., Pimentel, P. E. O. & Smukler, S. 2021. Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. *J. Clean. Prod.* 283, 124580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124580>
- Reynolds W. D., Drury C. F., Tan C. S., Fox C. A & Yang X. M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Ribeiro, B. T., Lima, J. M., Oliveira, G. C., Curi, N., Silva, E. A. & Silva, B. M. 2017. Ultrasonic aggregate breakdown of an Oxisol as affected by cavitation intensity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 48, 818-824. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1299170>
- Sá, M. A. C., Lima, J. M. & Mello, C. R. 2002. Level of ultrasonic energy to study aggregate stability of a Latosol (Oxisol) under different uses. *Pesq. Agropec. Bras.* 37, 1649-1655. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001100017>

- Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y.J., Tang, A. M. & Chaplain, V. 2009. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil Tillage Res.* 105, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.05.012>
- Sales, L. E. O., Carneiro, M. A. C., Severiano, E. C., Oliveira, G. C. & Ferreira, M. M. 2010. Physical quality of Quartzarenic Neosol submitted to different systems of agricultural use. *Cienc. e Agrotecnologia* 34, 667-674. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300020>
- Santos, H. G., Jacomine P. K. T., Anjos L. H. C., Oliveira V. A., Lumberras J. F., Coelho M. R., Almeida J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira J. B. & Cunha T. J. F. 2018. Brazilian Soil Classification System, 5.ed. Embrapa, Brasília E-book. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094001>
- SAS-Statistical Analysis System Institute, 1999. SAS/STAT Procedure guide for personal computers, fifth ed. SAS Institute, Cary.
- Schaefer, C. E. R., Gilkes, R. J. & Fernandes, R. B. A. 2004. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. *Geoderma* 123, 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.033>
- Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., 2015. Driver–pressure–state–impact–response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction: a European perspective. *Adv. Agron.* 133, 183–237. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001>
- Schmidt, M. W. I., Rumpel, C. & Kogel-Knabner, I., 1999. Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 87-94. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00211.x>
- Severiano, E.C., Oliveira, G.C., Dias Junior, M.S., Oliveira, L.F.C. & Castro, M.B. 2008. Preconsolidation pressure and least limiting water range as indicators of structural changes of a Latosol and a Cambisol under sugarcane. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 32, 1419-1427. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400006>
- Severiano, E. C., Oliveira, G. C., Dias Júnior, M. S., Costa, K. A. P., Silva, F. G. & Ferreira Filho, S. M. 2011a. Structural changes in latosols of the Cerrado region: I - Relationships between soil physical properties and least limiting water range. *Rev.*

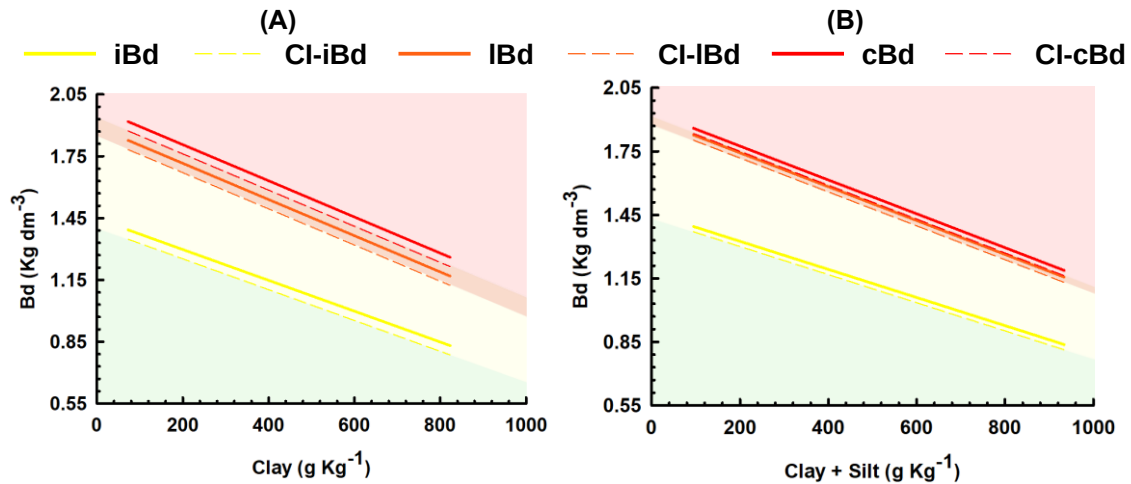
- Bras. Cienc. do Solo 35, 773-782. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300013>
- Severiano, E. C., Oliveira, G. C., Dias Júnior, M. S., Costa, K. A. P., Benites, V. M. & Ferreira Filho, S.M. 2011b. Structural changes in Latosols of the cerrado region: II - Soil compressive behaviour and modeling of additional compaction. Rev. Bras. Cienc. do Solo 35, 783-791. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300014>
- 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 Res. 51, 193-202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Silva, A. P., Kay, B. D. & Perfect, E. 1994. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, 1775-1781. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- Silva, J. F. G., Severiano, E. C., Costa, K. A. P., Benites, V. M., Guimarães Júnnyor, W. S. & Bento, J. C. 2014. Chemical and physical-hydric characterisation of a red latosol after five years of management during the summer between-crop season. Rev. Bras. Cienc. do Solo 38, 1576-1586. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500023>
- Silva, J. F. G., Goncalves, W. G., Costa, K. A. P., Flávio Neto, J., Brito, M. F., Silva, F. C. & Severiano, E.C. 2019a. Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. Semin Cienc Agrar. 40, 2973-2990. <https://doi.org/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. 2021. Are the yield of sunflower and Paiguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? Soil Tillage Res. v. 208, p. 104873. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104873>
- Silva, E. A., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Mallmann, M. S., Pereira, M. A., Pons, S. S. & Foggiam, W.S. 2019b. Soil conservation management with cover crops, effects on critical energy levels, release and dispersion of aggregates. Bragantia. 78, 444-453. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20180323>
- Silva, S. H. G., Weindorf, D. C., Pinto, L. C., Faria, W. M., Junior, F. W. A., Gomide, L. R. & Curi, N. 2020. Soil texture prediction in tropical soils: A portable X-ray

- fluorescence spectrometry approach. *Geoderma*, 362, 114136.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114136>
- 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. 2021. Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? *Soil Tillage Res.* v. 208, p. 104873. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104873>
- Simon, C. P., Gomes, T. F., Pessoa, T. N., Soltangheisi, A., Bieluczyk, W., Camargo, P. B., Martinelli, L. A. & Cherubin, M. R. 2022. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. *Rev. Bras. Cienc. do Solo*, 46, 1-21.
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>
- Snedecor, G. W. & Cochran, W. G. Statistical methods. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.
- Taurozzi, J.S.L., Hackley, V.A. & Wiesner, M.R. 2010. Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment-issues and recommendations. *Nanotoxicology* 5, 711-729.
<https://doi.org/10.3109/17435390.2010.528846>
- Tavanti, R.F.R., Freddi, O.S., Marchioro, V., Tavanti, T.R., Galindo, F.S., Wruck, F.J., Shiratsuchi, L. & Breda, C.C., 2019. Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. *Geoderma regional* 19, e00232. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00232>.
- Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A. & Teixeira, W.G. 2017. [editores técnicos]. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 573 p
- USDA, 2014. Keys to soil taxonomy. *Soil Conserv. Serv.* 12, 410.
- Vitorino, A. C. T., Ferreira, M. M., Curi, N., Lima, J. M., Silva, M. L. N. & Motta, P. E. F. 2003. Mineralogy, chemistry and stability of silt-size aggregates of soils from the Southeast Region of Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38, 133-141.
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000100018>
- Volland-Tuduri N., Bruand A., Brossard M., Balbino L. C., Oliveira M. I. L. & Martins E.S. 2005. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1559-1564.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0344>

Vomocil, J.A. & Flocker, W.J. 1966. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 4, 242-246.
<https://doi.org/10.13031/2013.4106>

Anexo A

Figure A. Pedotransfer functions for soil compaction diagnosis, with emphasis on the initial bulk density (iBd), which is limited by macroporosity at $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (lBd) and critical to plant yield based on the least limiting water range (cBd) as a function of total clay in the soil (A) or the clay plus silt content (B) in Brazilian tropical soils.



An interpretive proposition of the soil compaction state based on 95% confidence interval (CI) of pedotransfer functions is described as follows:

- The green coloration indicates the disturbed soil (“Disturbed soil”) condition, in which the ordered pair " Bd, clay " or " $Bd, \text{clay} + \text{silt}$ " is smaller than the lower limit of the CI of initial bulk density “iBd” ($Bd < \text{CI-iBd}$). The low value indicates the occurrence of recent disturbance (i.e., occasional tillage in no-tillage systems prior to sampling) and the Bd value suggests compatibility with soil under the natural condition.
- The yellow coloration indicates no soil compaction (“No compaction”), when $\text{CI-iBd} < "Bd, \text{clay}" < \text{CI-lBd}$ or $\text{CI-iBd} < "Bd, \text{clay} + \text{silt}" < \text{CI-lBd}$ (lower limit of the CI of limiting density). This structural condition is compatible with good management and the absence of limiting compaction, whether beneficial compaction occurs or not.
- The orange coloration indicates that soil compaction limits the edaphic functions of the soil due to structural degradation (“Limiting compaction”), when $\text{CI-lBd} < "Bd, \text{clay}" < \text{CI-cBd}$ or $\text{CI-lBd} < "Bd, \text{clay} + \text{silt}" < \text{CI-cBd}$ (lower limit of the CI of cBd). Here, macroporosity is reduced to $0.10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3} \pm \text{CI}$, compromising processes regulated by soil structure, such as gas exchange and groundwater recharge, as well as crop yield.
- The red coloration indicates complete physical degradation of the soil, when " Bd, clay " $> \text{CI-cBd}$ or " $Bd, \text{clay} + \text{silt}$ " $> \text{CI-cBd}$. The soil density has reached values higher than the critical values required for plant growth and yield based on the least-limiting water range.

CAPÍTULO II

AGRICULTURA REGENERATIVA NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E NA RECARGA HÍDRICA SUBTERRÂNEA

Resumo: A adoção da agricultura regenerativa em solos tropicais tem sido proposta como alternativa para mitigar os efeitos da degradação física do solo e aumentar a capacidade de recarga hídrica subterrânea, sobretudo em regiões com elevada suscetibilidade à compactação, como o Cerrado brasileiro. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos das práticas regenerativas sobre a qualidade física do solo e a relação com a infiltração de água e aeração em áreas comerciais de produção agrícola. O trabalho foi conduzido em nove talhões distribuídos em oito fazendas no sudoeste de Goiás, e foi calculado um Índice de Agricultura Regenerativa (IAR) considerando cinco princípios básicos de manejo. Amostras indeformadas de solo foram coletadas em três camadas estabelecidas pela análise do perfil de solo via penetrometria a campo (superficial, rasa e rasa-moderada) e avaliadas quanto à densidade, porosidade, condutividade hidráulica saturada (K_0), permeabilidade ao ar (K_{ar}) e retenção de água. A diagnose da compactação foi realizada com base em funções de pedotransferência ajustadas para os solos da região. Os resultados indicaram que, apesar de avanços na qualidade física da camada superficial, a compactação persiste nas camadas subsuperficiais, limitando as funções edáficas. A análise multivariada apontou a macroporosidade como o atributo-chave na discriminação das condições estruturais. Além disso, o IAR mostrou efeitos positivos, porém ainda incipientes, sobre a condutividade hidráulica e a densidade relativa do solo. Conclui-se que a agricultura regenerativa possui potencial para restaurar a qualidade física dos solos tropicais, mas sua efetividade depende de maior tempo de adoção e da implementação integral de seus princípios, com destaque para a diversificação de cultivos.

Palavras-chave: perfil do solo, diagnose da compactação do solo, permeabilidade do solo, solos tropicais, diversidade de cultivos.

Abstract: The adoption of regenerative agriculture in tropical soils has been proposed as an alternative to mitigate the effects of soil physical degradation and to enhance groundwater recharge capacity, especially in regions with high susceptibility to

compaction, such as the Brazilian Cerrado. This study aimed to evaluate the effects of regenerative practices on soil physical quality and their relationship with water infiltration and aeration in commercial agricultural areas. The research was carried out in nine plots distributed across eight farms in southwestern Goiás, where a Regenerative Agriculture Index (RAI) was calculated considering five basic management principles. Undisturbed soil samples were collected at three depths established through soil profile analysis by field penetrometry (surface, shallow, and shallow-moderate) and evaluated for bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity (K_o), air permeability (K_{ear}), and water retention. Soil compaction diagnosis was performed based on pedotransfer functions adjusted for the soils of the region. The results indicated that, despite improvements in the physical quality of the surface layer, compaction persists in subsurface layers, restricting soil functions. Multivariate analysis identified macroporosity as the key attribute for discrimination of structural conditions. Moreover, the RAI showed positive, though still incipient, effects on hydraulic conductivity and relative bulk density. It is concluded that regenerative agriculture has potential to restore the physical quality of tropical soils; however, its effectiveness depends on longer adoption time and the full implementation of its principles, particularly crop diversification.

Keywords: Soil profile; Soil compaction diagnosis; Soil permeability; Tropical soils; Crop diversity.

1. INTRODUÇÃO

Impulsionado pelos avanços científicos e por esforços coordenados dos seus fazendeiros, o Brasil vem se consolidando como um dos principais protagonistas agropecuários globais (Camargo *et al.*, 2017; Piras *et al.*, 2021). Estima-se que o país será responsável por suprir até 40% da demanda mundial por alimentos até 2050 (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016), numa área destinada à agricultura de aproximadamente de 77 milhões de hectares - apenas 8,6% do território nacional (Basso *et al.*, 2024; Battisti *et al.*, 2020) - mas com potencial de expansão sustentável em áreas já antropizadas, especialmente por meio da adoção de sistemas integrados de produção agropecuária (Prado *et al.*, 2025).

Os campos de produção estão majoritariamente inseridos em solos altamente intemperizados que, embora apresentem elevada aptidão agrícola, são marcados pela vulnerabilidade (Severiano *et al.*, 2013; Rezende *et al.*, 2025). A intensificação produtiva alavancada pelo uso de tecnologias e tráfego de máquinas em todas as etapas do processo

produtivo tem acelerado a degradação dos recursos naturais, solo e água, comprometendo a sustentabilidade agrônômica e os serviços ecossistêmicos essenciais (Wagg *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2021). Esse quadro se torna ainda mais crítico diante do modelo de agricultura intensiva de grãos, fortemente baseado no monocultivo da soja durante a safra de verão e na produção concentrada de milho na segunda safra (inverno) (Nóia Júnior & Sentelhas, 2019).

Na contramão deste sistema de sucessão de culturas, a diversificação ecológica dos cultivos destaca-se como componente de ativação de processos biológicos de resiliência e de restauração da saúde do solo (Marchão *et al.*, 2009; Silva, *et al.*, 2019; Barbosa *et al.*, 2023). Em destaque, a conversão de sistemas tradicionais à sistemas conservacionistas tem sido a tônica das discussões no mundo em busca de soluções tecnológicas de uso racional do solo (Kassam *et al.*, 2019; Anghinoni *et al.*, 2021), de produção de alimentos (e todos os outros produtos agropecuários) em quantidade suficiente para uma população em crescimento e em respeito às fragilidades ambientais (Willett *et al.*, 2019).

Neste sentido, a agricultura regenerativa emerge com o propósito de restauração edáfica e da capacidade produtiva das fazendas, com a redução dos custos de produção advindos da redução de inputs de insumos sintéticos e/ou a sua substituição por bioinsumos e otimização de transformações bioquímicas de energia e matéria (LaCanne & Lundgren., 2018; Sherwood & Uphoff., 2000; Tiftonell *et al.*, 2022). Com a premissa de desenvolvimento de uma agropecuária de processos, e ao notarem o declínio das funções edáficas causada pela adoção de sistemas de monocultivos, um grupo de agricultores do Cerrado brasileiro associaram-se em um movimento pioneiro buscando adequar o manejo para melhorar a saúde do solo de forma prática e fundamentados nos princípios deste modelo de agricultura, a saber: limitar a perturbação do solo à linha de semeadura, cobrir a superfície do solo, promover a diversidade dos cultivos, manter as raízes vivas no solo tanto quanto possível e, também, integrar animais (Brown, 2018).

Giller *et al.* (2021) ressaltam que a agricultura regenerativa apresenta especificidades de acordo com o pedoambiente em que é aplicada. Embora estudos internacionais recentes confirmem o potencial das práticas regenerativas, essas têm sido, em sua maioria, avaliadas de forma isolada (Fenster *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2024). Diante disso, torna-se pertinente considerar as observações de Serafim *et al.* (2023) sobre a importância de desenvolver pesquisas em áreas comerciais pelo fato de otimizar não apenas tempo e recursos (Schnug *et al.*, 1996), mas também por permitir a interação direta

com todos os componentes do sistema produtivo (Vizcayno-Soto & Côté, 2004). Além disso, favorece a identificação de relações ecológicas sinérgicas e a compreensão das interações entre fatores bióticos e abióticos, incluindo aspectos edáficos, climáticos, de uso e de manejo (Sentelhas *et al.*, 2015).

Em condições de clima tropical, os resultados científicos da agricultura regenerativa ainda na qualidade física do solo são escassos (Romanoski *et al.*, 2025). Em contrapartida à relevância mundial da agricultura brasileira, a altíssima suscetibilidade dos solos à compactação numa agricultura altamente mecanizada (Severiano *et al.*, 2013) ainda carece de alternativas de manejo e motiva execução de estudos pioneiros de enfrentamento deste grave problema. A hipótese deste trabalho é que as práticas adotadas a partir da conversão de sistemas comuns para a agricultura regenerativas são eficazes na mitigação da degradação física do solo presente em sistemas de monocultivos de grãos. Assim, objetivou-se avaliar os impactos das práticas de agricultura regenerativa sobre os atributos físicos e hídricos de solos com diferentes texturas, estabelecendo relações entre os métodos regenerativos de cultivo e a qualidade estrutural destes solos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Especificação das áreas amostrais e caracterização das fazendas analisadas

Para realização do estudo foram analisados nove talhões em oito fazendas localizadas na região sudoeste do estado de Goiás, Brasil, situadas nos municípios de Montividiu e Rio Verde (Figura 1) e participantes de um projeto denominado “Regenera Cerrado”. A região é recoberta por relevos pouco dinâmicos e pelos solos mais antigos do planeta, oriundos do Cretáceo e do Terciário (Marques *et al.*, 2004), maioritariamente pertencentes a classe dos Latossolos [segundo a classificação brasileira - Santos *et al.* (2025); Oxisols na USA Keys of Soil Taxonomy - Soil Survey Staff (2022) ou Ferralsols na World Reference Base for Soil Resources - IUSS Working Group WRB (2022)]. Em todas as áreas avaliadas, os solos foram classificados como Latossolos Vermelhos de textura argilosa ou muito argilosa.

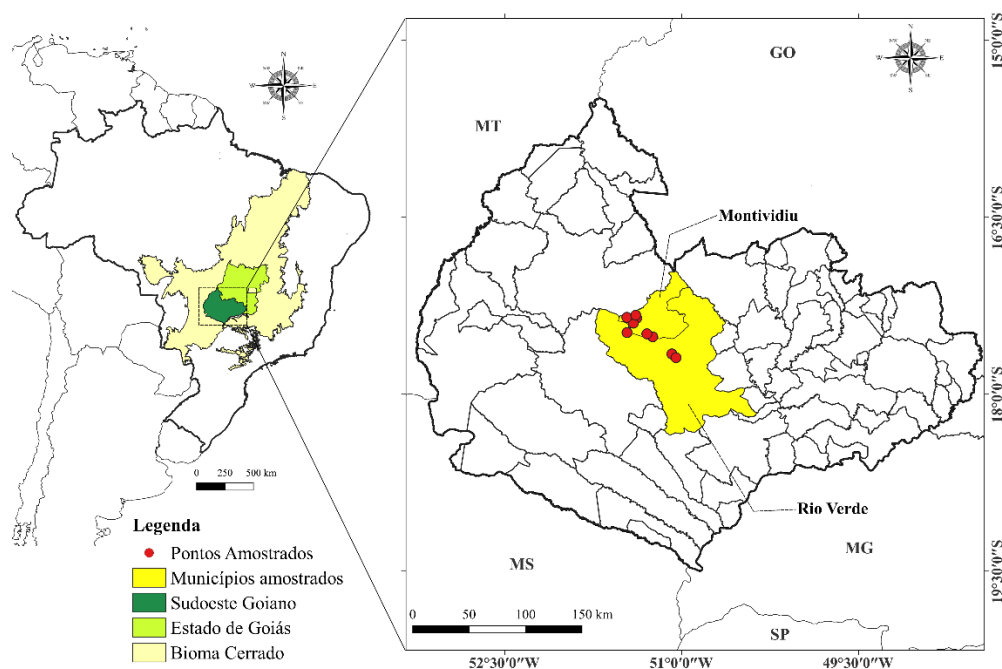


Figura 1. Mapa político do Brasil mostrando o Bioma Cerrado, o estado de Goiás, o sudoeste Goiano, os municípios amostrados e os pontos representando os locais de amostragem.

A classificação climática, segundo Köppen, é do tipo Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana com inverno seco e verão chuvoso, temperatura média anual em 25°C e média pluviométrica anual aproximadamente de 1600 mm (Alvares *et al.*, 2013).

As fazendas avaliadas adotavam, historicamente, um modelo intensivo de produção de grãos, baseado na sucessão soja-milho, com uso predominante do plantio direto, alta mecanização e aplicação intensiva de insumos químicos e sementes geneticamente modificadas, conforme os padrões tecnificados da região Centro-Oeste brasileira. Este manejo foi realizado por, no mínimo, 20 anos e, nos últimos anos, essas áreas passaram por um processo de transição para a agricultura regenerativa, incorporando as práticas conservacionistas com diferentes níveis de adoção.

Para mensurar a utilização das práticas de manejo relacionadas à estrutura do solo, foram considerados os cinco princípios estabelecidos pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO/ONU) e descritas por Brown (2018), realizando o seguinte levantamento junto aos fazendeiros:

- Princípio 1. Perturbação mínima do solo:

- a. Realização de revolvimento do solo por operações de preparo;
- b. Identificação do mecanismo de abertura de sulco de semeadura.

- Princípio 2. Manutenção da cobertura do solo:

- a. Realização de consorciação de culturas;
- b. Produção de biomassa de cobertura.

- Princípio 3. Diversificação de cultivos:

- a. Frequência da rotação de culturas;
- b. Número de espécies cultivadas.

- Princípio 4. Manutenção de raízes vivas no solo:

- a. Frequência dos cultivos consorciados entre milho e plantas forrageiras;
- b. Número de espécies cultivadas no consórcio.

- Princípio 5. Integração com animais:

- a. Uso de resíduos e coprodutos da produção animal;
- b. Realização de pastejo animal.

Os resultados foram integrados para a proposição de um índice de agricultura regenerativa (IAR) com vistas à quantificação das alterações estruturais do solo, seguindo a adaptação do método sugerido por Jaworski *et al.* (2024) e atribuindo valores de 0 a 1, sendo quanto mais próximo a 1 maior a adoção dos princípios. A compilação destas informações pode ser visualizada na planilha de cálculo disponível na Planilha A do material suplementar (Anexo B), e a localização das fazendas com a respectiva caracterização das áreas é apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Localização e caracterização das fazendas de agricultura regenerativa analisadas no Sudoeste Goiano do Cerrado brasileiro.

Fazenda	Coordenadas geográficas	Altitude (m)	Área Avaliada (hectares)	Textura ⁽¹⁾			IAR ⁽²⁾	Tempo de implantação (anos)
				Areia	Silte	Argila		
				-----	g kg ⁻¹	-----		
F1	17°20'33.24"S, 51°23'11.14"W	875	73	178,1	130,3	691,6	0,25	6
F2	17°20'53.80"S, 51°27'49.30"W	903	91,0	445,4	99,0	455,6	0,43	3
F3	17°21'20.47"S, 51°22'52.68"W	885	58	266,0	149,9	584,1	0,18	6
F4	17°23'50.47"S, 51°24'32.67"W	924	32	323,5	73,1	603,4	0,35	3
F5	17°28'37.30"S, 51°27'45.18"W	943	78	103,8	65,9	830,3	0,48	3
F6	17°29'40.59"S, 51°17'13.30"W	897	100	213,1	70,9	716,0	0,68	2
F7	17°30'45.10"S, 51°15'48.37"W	902	150	188,0	64,6	747,4	0,65	2
F8	17°39'29.98"S, 51°4'56.24"W	850	110	298,6	50,3	651,1	0,50	3
F9	17°39'47.64"S, 51°4'39.41"W	850	45	300,2	55,7	644,1	0,25	3

⁽¹⁾ Areia (partículas entre 2,00-0,05 mm); Silte (0,05-0,002 mm); Argila (< 0,002 mm). ⁽²⁾ Índice de agricultura regenerativa, calculado a partir das práticas agrícolas executadas na fazenda e descritas na Planilha A do material suplementar (Anexo B).

2.2. Procedimentos amostral e avaliações de campo

Todas as avaliações e amostragens foram realizadas ao decorrer da safra 2022/23. Para posicionamento nas lavouras, foram demarcados quatro pontos de forma a melhor representar a variabilidade da área. Estes, foram localizados em campo com o auxílio de um receptor GPS (Global Position System) e posicionados aproximadamente a 250 metros de distância um do outro (Figura A, material suplementar no anexo B).

Em cada ponto amostral e priorizando o momento em que o solo encontrasse com o conteúdo de água que o condicionasse o estado de friabilidade, foi realizado o teste de penetrometria com o auxílio de um penetrômetro de impacto (Stolf *et al.*, 1983), e avaliando-o até 0,6 metros de profundidade. Na sequência, as camadas de solo com ocorrência de impedimento mecânico foram classificadas, conforme a profundidade diagnóstica em:

- Camada superficial (0 a 0,1 m de profundidade), para expressar a interface solo-atmosfera;
- Camadas rasa (0,1 a 0,2 m) e rasa-moderada (0,2 a 0,3 m), para expressar as afetadas por processos biológicos (Silva *et al.*, 2019);
- Camada profunda-moderada (0,3 a 0,5 m), em que ainda há impacto do manejo de produção de grãos (Oliveira *et al.*, 2004) e;
- Camada profunda (abaixo de 0,5 m de profundidade), praticamente livre dos impactos do manejo, expressando majoritariamente a gênese do solo.

A fim de avaliar todas as fazendas numa mesma escala, os resultados de resistência do solo à penetração (RP em MPa e expressos na Figura C do material suplementar) foram normalizados dividindo os valores do perfil avaliado pelo maior valor encontrado (RP normalizada, 0 a 1). Na camada superficial e nas duas contrastantes pelos testes de penetrometria, foram coletadas amostras indeformadas de solos em anéis volumétricos de 0,06 m de diâmetro e 0,06 m de altura posicionando-os à profundidade de maior resistência dentro da camada e, totalizando 108 amostras (9 fazendas x 4 pontos x 3 camadas). Para maior integridade, as camadas de maior impedimento mecânico foram obtidas com o auxílio de um amostrador do tipo macaco hidráulico ao passo que as demais camadas foram coletadas com a utilização do amostrador de impacto, considerado como procedimento padrão de amostragem indeformada de solos. As imagens que ilustram esse procedimento de amostragem podem ser visualizadas na figura B, localizada no anexo.

2.3. Procedimentos laboratoriais

As amostras de solo foram conduzidas ao Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, após um preparo inicial, tiveram o solo excedente ao volume dos cilindros removido tendo as sobras secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm de diâmetro para obtenção da terra fina seca ao ar. A textura, definida neste estudo como a distribuição granulométrica da fração mineral, foi analisada por meio de dispersão química adição de NaOH 1N, mantido em contato com a amostra por 24 horas e seguida da dispersão física com agitação lenta (50 rpm) e utilização de areia grossa como agente abrasivo por 16 horas. A quantificação das frações granulométricas foi realizada da seguinte forma: as partículas de areia (diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm) foram separadas por tamisação, enquanto as frações silte (0,05 - 0,002 mm) e argila (<0,002 mm) foram determinadas por sedimentação diferencial pelo método da pipeta, de acordo com a metodologia descrita em Teixeira *et al.* (2017).

Inicialmente, as amostras indeformadas foram saturadas por capilaridade através da elevação gradual de uma lâmina de água durante 48 horas equilibradas à tensão matricial de -6 kPa em funis de placa porosa, conforme em Teixeira *et al.* (2017). Este ponto de equilíbrio é considerado como representativo da microporosidade do solo (Micro) e do potencial do solo na capacidade de campo, de acordo com Severiano *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2021) para o solo em estudo.

Adicionalmente, e somente nas amostras coletadas na camada mais impeditiva, foram determinados antes do equilíbrio mátrico o peso saturado e submetidas ao ensaio de permeabilidade à água (K₀) utilizando um permeâmetro de carga constante, seguindo as recomendações em Teixeira *et al.* (2017). Após o equilíbrio na referida tensão, foram submetidas ao ensaio de permeabilidade ao ar (K_{ear}) utilizando um permeâmetro desenvolvido por Silva *et al.* (2009), que é uma adaptação do instrumento de McKenzie & Dexter (1996) e que emprega o método da pressão decrescente.

Na sequência, todas as amostras indeformadas foram submetidas ao aparelho extrator de Richards e equilibradas à tensão matricial de -100 kPa e -1.500 kPa, conforme metodologia relatada em Teixeira *et al.* (2017). Finalmente, foram pesadas e submetidas à estufa a 105°C durante 48 horas para determinação da massa seca.

A densidade do solo (D_s) foi calculada pela relação entre a massa seca e o respectivo volume, seguindo os procedimentos descritos em Teixeira *et al.* (2017). A porosidade total (PT) foi considerada a conteúdo de água no solo saturado. Já a macroporosidade do solo (Macro) foi determinada pela diferença entre a PT e Micro,

conforme metodologia apresentada em Teixeira *et al.* (2017). Adicionalmente, calculou-se a relação entre macroporos e microporos (Mac_Mic) e os conteúdos de água retidos à -100 kPa ($\theta_{100\text{kPa}}$) e a -1.500 kPa ($\theta_{1500\text{kPa}}$).

A água prontamente disponível (APD) e à água disponível (AD) foram determinadas utilizando as equações 1 e 2, respectivamente, em que $\theta_{6\text{kPa}}$ representa o conteúdo de água equivalente à capacidade de campo (e correspondente à tensão mátrica de -6 kPa), enquanto $\theta_{100\text{kPa}}$ corresponde ao conteúdo de água crítico, equivalente à tensão mátrica de -100 kPa e $\theta_{1500\text{kPa}}$ corresponde ao conteúdo de água no ponto de murcha permanente (equivalente à tensão mátrica de -1500 kPa), segundo Teixeira *et al.* (2017).

$$APD = \theta_{6\text{kPa}} - \theta_{100\text{kPa}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$AD = \theta_{6\text{kPa}} - \theta_{1500\text{kPa}} \quad \text{Eq. 2}$$

A capacidade de campo relativa (CCr) foi calculada segundo recomendações de Reynolds *et al.* (2008), utilizando a equação 3, em que $\theta_{6\text{kPa}}$ representa o conteúdo de água equivalente à capacidade de campo (correspondente à tensão mátrica de -6 kPa), enquanto θ_s corresponde ao conteúdo de água do solo em condição de saturação.

$$CCr = \theta_{6\text{kPa}} / \theta_s \quad \text{Eq. 3}$$

Por fim, a densidade do solo relativa (Dsrel), calculada pela equação 4, foi utilizada para avaliar as consequências da compactação na matriz sólida do solo, conforme instruções de Håkansson (1990).

$$Dsrel = Ds / Dsref \quad \text{Eq. 4}$$

Em que Dsref é a Ds limitante (Dsl) às funções edáficas (agronômicas e ambientais) do solo alcançada quando valor de Ds correspondente à macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Vomocil & Flocker, 1961) e sendo obtida das funções de pedotransferência (FPTs) propostas por Rezende *et al.* (2025).

2.4. Tratamento estatístico dos resultados

Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente R. Os resultados obtidos em todas as amostras de solo foram submetidos a análise exploratória por meio de estatística descritiva e de componentes principais para compreender de forma global a discriminação das camadas com base nas variáveis analisadas, sendo utilizados os pacotes

"tidyverse", "stats" e "factoextra". Para avaliação da contribuição das variáveis avaliadas na composição da PCA foi considerada a média em cada dimensão.

Para diagnose da compactação do solo, foi considerada o atendimento aos seguintes critérios de julgamento da Ds pela condição estrutural do solo em função do conteúdo de argila e considerando as FPTs (Figura 2) de Rezende *et al.* (2025):

- Solo perturbado:

a. Se $D_s < \text{densidade do solo inicial (Dsi)}$.

- Sem compactação:

a. Se $D_s > D_{sl}$ ou $D_s < D_{sl}$ e $\text{Macro} > 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3} - \text{Intervalo de confiança (IC, } 0,02 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3})$, atende ao critério de solo não compactado ("Sim").

- Compactação limitante:

a. Se $D_s > D_{sl}$ e $\text{Macro} < 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3} + \text{IC}$, atende ao critério da compactação do solo limitante ("Sim").

- Compactação severa:

a. Se $D_s > \text{densidade do solo crítica (Dsc)}$ e $\text{Macro} < 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3} + \text{IC}$, atende ao critério da compactação severa ("Sim").

- Critérios de julgamento não atendidos:

a. Se $D_s < D_{sl}$ e $\text{Macro} < 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3} + \text{IC}$, não atende ao critério da densidade do solo limitante por incompatibilidade de valores de Ds e macro ("Não"), e;

b. Se $D_s > D_{sl}$ e $\text{Macro} > 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3} - \text{IC}$, também não atende ao critério da densidade do solo limitante por incompatibilidade de valores de Ds e macro ("Não").

A partir dos dados categóricos, foi determinado o índice de acuracidade metodológica (quantidade de "Sim" no total das 108 amostras julgadas – planilha B do material suplementar). Por fim, os valores de Ds em função do conteúdo de argila obtidos nas três camadas avaliadas em cada fazenda foram plotados figura 2.

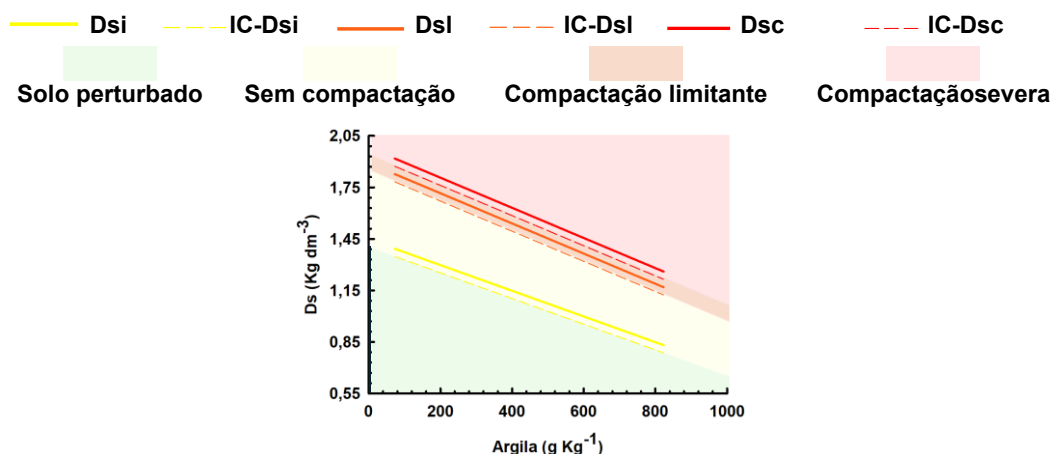


Figura 2. Funções de pedotransferência para o diagnóstico de compactação do solo, com ênfase na densidade inicial do solo (Dsi), a que é limitada pela redução da macroporosidade em $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Dsl) e a crítica para o crescimento e produtividade das plantas com base no intervalo hídrico ótimo (Dsc) em função da argila total no solo em solos tropicais brasileiros. IC: intervalo de confiança da análise de regressão.

Fonte: Rezende *et al.* (2025).

Por fim, e para compreender as relações de causa e efeito entre variáveis representativas das principais funções físicas governadas pela estrutura (Dsr) e pelo fluxo hídrico (K_0) e de ar (K_{ar}) no solo, foram realizadas análises de correlação de Pearson e classificadas como baixa ($r \leq 0,30$), moderada ($0,30 < r \leq 0,70$) e alta ($r > 0,70$), além de análise de trilha. Para tanto, as variáveis conteúdo de argila, tempo de implantação e IAR foram consideradas as independentes para a variável dependente Dsr e, esta, também uma variável independente para K_0 e K_{ar} .

Inicialmente, todas as variáveis foram padronizadas pela fórmula equação 5.

$$\left(\frac{Y_i - \mu}{\sigma} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

Em que Y_i é o valor observado da variável para a i -ésima amostra, μ é a média da variável no conjunto de dados e σ é o desvio padrão da variável no conjunto de dados.

Em seguida, ajustou-se um modelo de regressão linear múltipla para cada variável dependente em função das independentes. A presença de multicolinearidade entre as variáveis explicativas foi avaliada por meio do fator de condição (razão entre o maior e o menor autovalor da matriz de correlação), considerando-se que valores de número de condição (NC) < 100 indicam multicolinearidade fraca, não comprometendo a análise (Cruz *et al.*, 2014).

Adicionalmente, utilizou-se o Fator de Inflação da Variância (VIF) como medida complementar da multicolinearidade. O VIF quantifica quanto da variância estimada por um coeficiente de regressão é inflacionada devido à correlação com outras variáveis independentes do modelo e valores superiores a 10 são considerados indicativos de multicolinearidade severa.

As contribuições dos efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes foram expressas em porcentagens. Contribuições superiores a 50% foram interpretadas como de alto efeito direto (Botelho *et al.*, 2019; Ribeiro *et al.*, 2017). As análises estatísticas de trilha foram realizadas por meio dos pacotes “corrplot”, “lavaan” e “semPlot”.

3. RESULTADOS

A resistência à penetração (RP normalizada) obtida *in situ* diferenciou as camadas em todas as fazendas avaliadas, conforme podem ser visualizadas na figura 3 e detalhadas no material suplementar (Figura C, Anexo B). A camada superficial apresenta valores de RP entre 0,35 e 0,75, enquanto a camada de maior resistência mecânica posiciona-se em profundidades rasas em todas, entre 0,1 e 0,2 m (RP normalizado = 1). A camada seguinte, rasa-moderada e entre 0,2 e 0,3 m, apresenta a segunda maior impedância no perfil de solo, com valores entre 0,7 e 0,9. Nas camadas profundas repete-se o padrão superficial, com algumas fazendas apresentando $RP < 0,3$ a 0,5 m de profundidade.

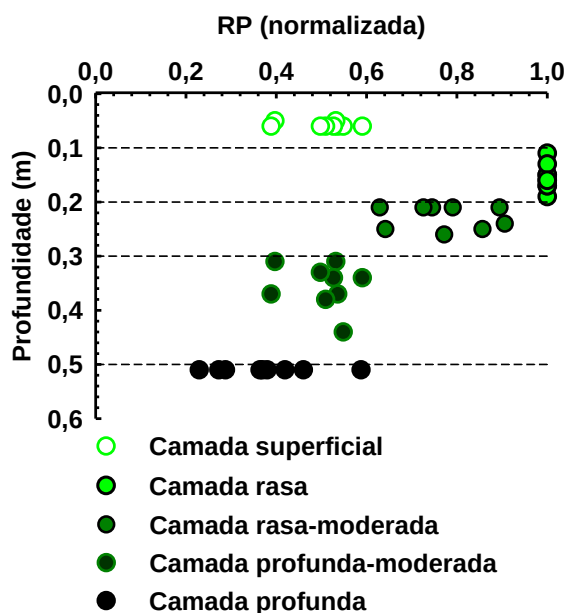


Figura 3. Resistência do solo à penetração, normalizada, em fazendas de agricultura regenerativa no Cerrado brasileiro.

Com base na RP de campo, foram estabelecidas as seguintes camadas para amostragem de solo e caracterização física dos pedoambientes: a camada superficial, a camada rasa como a representativa da maior impedância e a adotada para investigação do papel da agricultura regenerativa nas funções edáficas governadas pela estrutura do solo, além da camada rasa-moderada, de comportamento intermediário em relação às demais.

A análise de componentes principais, representada no biplot e seu correlograma, é apresentada na figura 4 e indica que a primeira dimensão (Dim1) explica 48,2% da variância total dos dados, enquanto a segunda dimensão (Dim2) 26,5% da variância, essas capturam 74,7% de toda a variabilidade destes resultados. Este valor é considerável, sugerindo que o biplot bidimensional oferece adequada estrutura geral dos dados.

A primeira dimensão (Dim1) é o principal eixo de variação dos resultados (Figura 4A) e foi fortemente influenciada positivamente pelas variáveis CCr e $\theta_{1500\text{kPa}}$ e negativamente pelas variáveis Macro, Mac_Mic, PT e AD. Já a segunda dimensão (Dim2), ortogonal à Dim1, captura o segundo padrão de variação, positivamente influenciado principalmente por Micro, PT e $\theta_{100\text{kPa}}$ e negativamente, influenciada por Ds. Pela análise do correlograma (Figura 4B), APD influencia fortemente a Dim3, seguida de AD. Juntas, as três primeiras dimensões capturaram 94,4% da variabilidade dos dados.

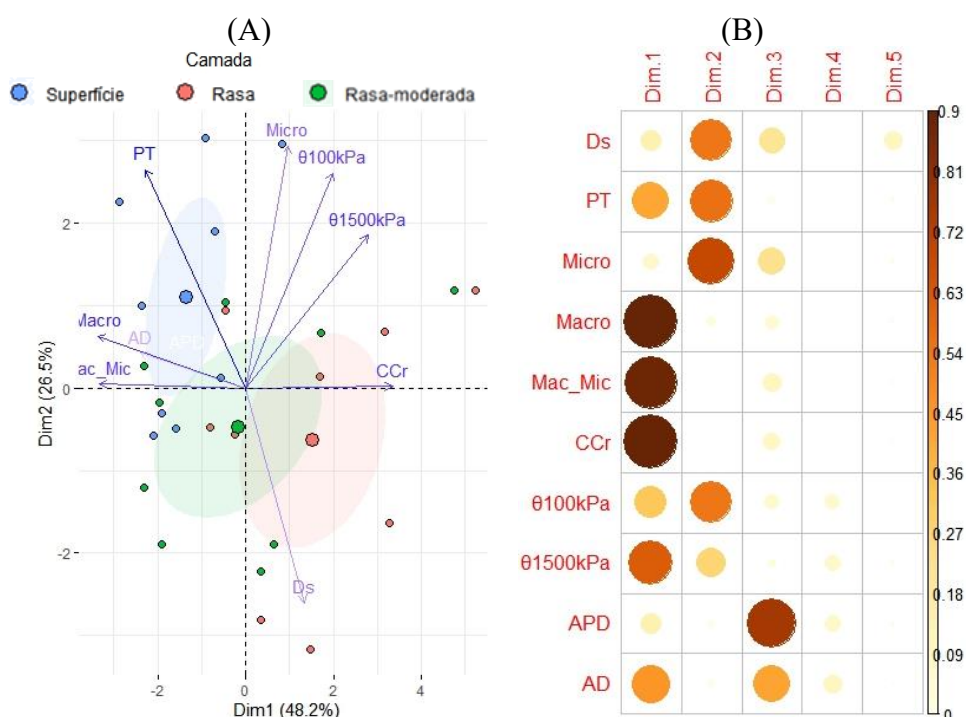


Figura 4. Dispersão bidimensional dos escores (A) e correlograma (B) da análise de componentes principais de 10 variáveis físicas do solo avaliadas em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro. Ds: Densidade do solo (kg dm^{-3}); PT:

porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Mac_Mic: relação macro:microporos (adimensional); CCr: capacidade de campo relativa (adimensional); $\theta_{100\text{kPa}}$: conteúdo de água crítico ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); $\theta_{1500\text{kPa}}$: conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); APD: água prontamente disponível ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); AD: água disponível ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$).

Continuando as observações das variáveis pela formação das elipses no biplot (Figura 4A), há dois grupos principais de atributos que caracterizam condições estruturais contrastantes entre as camadas superficial e rasa. A camada superficial (elipse azul) caracteriza-se por vetores de escores negativos na dimensão 1 e positivos na 2, com maior influência de Macro, Mac_Mic, PT e AD, ao passo que a camada rasa (elipse vermelha) caracteriza-se por maiores escores de vetores opostos, isto é, positivo em Dim1 e negativo em Dim2 por respectivamente CCr e Ds. Por sua vez, a camada rasa-moderada (elipse verde) teve comportamento intermediário e contribuições fracas das variáveis supracitadas em relação às outras duas, estando, contudo, mais próxima à camada rasa e reforçando as medições de campo (Figura 3).

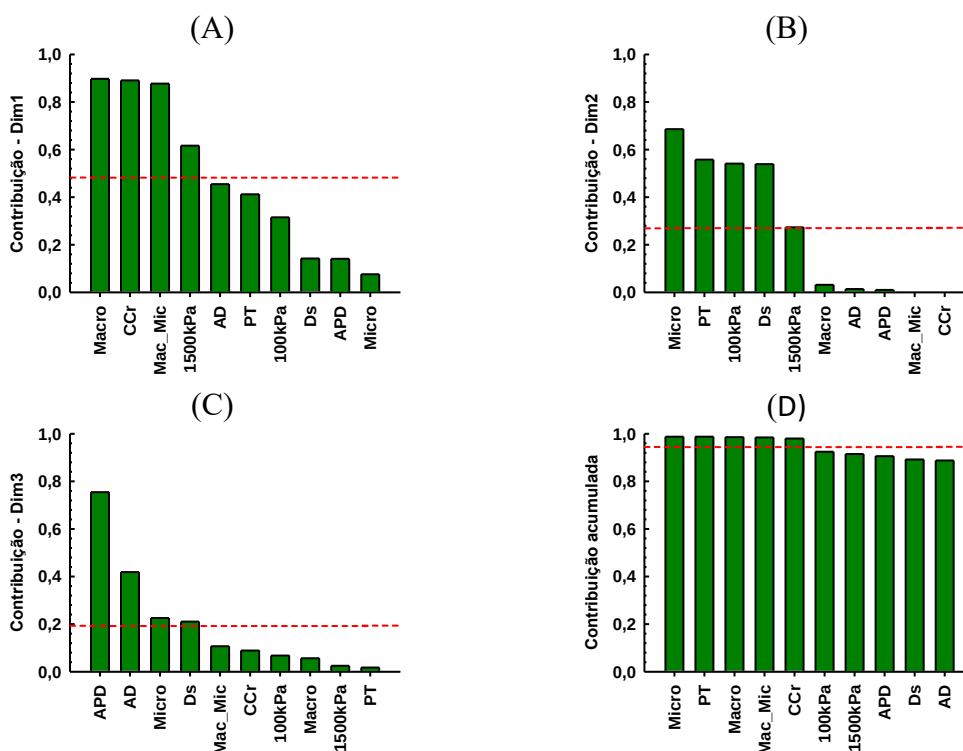


Figura 5. Contribuição das variáveis físicas do solo com a primeira (A), a segunda (B), a terceira dimensão (C) e acumulada nas três juntas (D), da análise de componentes principais avaliadas em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro. A linha pontilhada representa a contribuição média da dimensão. Ds: Densidade do solo (kg dm^{-3}); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Mac_Mic: relação macro:microporos (adimensional); CCr: capacidade de campo relativa (adimensional); $\theta_{100\text{kPa}}$: conteúdo de água crítico ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); $\theta_{1500\text{kPa}}$:

conteúdo de água no ponto de murcha permanente($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); APD: água prontamente disponível ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); AD: água disponível ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$).

A contribuição das variáveis dependentes à PCA é apresentada na figura 5. A Dim1 é primariamente definida pelas variações em $\text{Macro} > \text{CCr} > \text{Mac_Mic} > \theta_{1500\text{kPa}}$ (Figura 5A), evidenciada pelo módulo dos vetores no biplot (Figura 4A). Já a Dim2 foi mais influenciada por $\text{Micro} > \text{PT} > \theta_{100\text{kPa}} > \text{Ds}$ (Figura 5B) e ao passo que as variáveis de disponibilidade hídrica destacam-se em Dim3 ($\text{APD} > \text{AD}$) e seguidas por Micro e Ds (Figura 5C). Ao considerar a contribuição acumulada, mas três dimensões (Figura 5D), a Micro foi a variável de maior impacto na estrutura dos resultados e seguida de $\text{PT} > \text{Macro} > \text{Mac_Mic} > \text{CCr}$, cujas contribuições se deram em proporções acima da média das variáveis. As demais, embora abaixo, encontravam-se próximas à média e indicaram também adequada capacidade preditiva das alterações estruturais do solo decorrente do manejo avaliado.

A Figura 6 apresenta o diagnóstico da compactação do solo baseado nas amostras examinadas nas fazendas estudadas e na acuracidade de 98% pelo critério de julgamento considerado (106 das 108 amostras de solos avaliadas contemplaram os critérios propostos; Planilha B - material suplementar do anexo B).

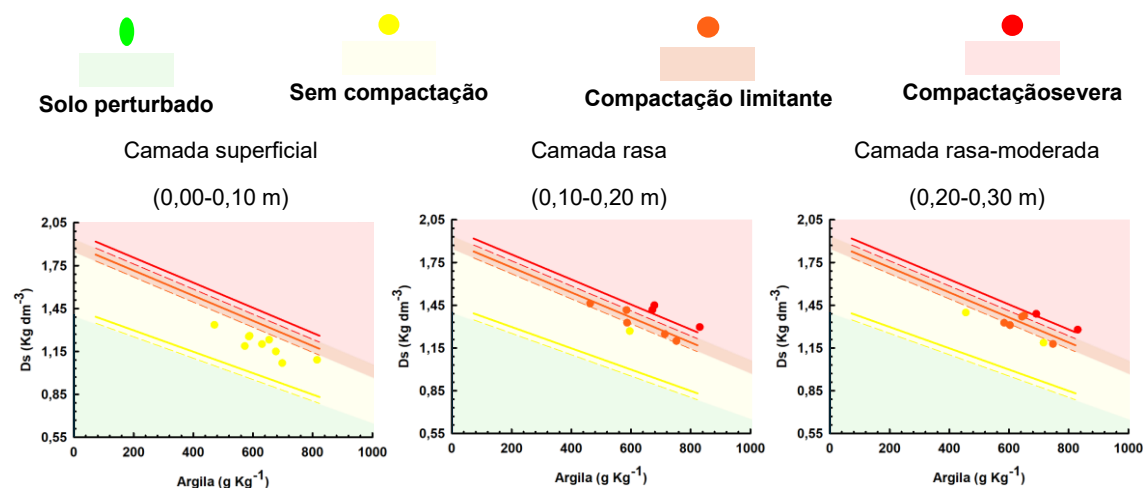


Figura 6. Distribuição dos valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila no perfil de solo em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro. A área sombreada representa os seguintes critérios de julgamento: - abaixo do limite superior do intervalo de confiança de Dsi (verde): solo perturbado; - entre o limite superior do intervalo de confiança de Dsi e o inferior de Dsl (amarelo): sem compactação; - entre intervalo de confiança de Dsl (laranja): compactação limitante e; - acima do limite superior do intervalo de confiança de Dsl (vermelho): compactação severa.

Evidencia-se a camada rasa (0,1-0,2 m) como a mais impeditiva e com apenas uma fazenda sem compactação (cinco apresentaram compactação limitante e três com compactação severa). A camada a seguir, rasa-moderada (0,2-0,3 m), também aponta o risco iminente de degradação física do solo pela ocorrência majoritária de compactação limitante (apenas duas fazendas não tiveram registro do problema e outras duas tinham compactação severa), enquanto na camada superficial (0-0,1 m) não houve registros de nenhum problema de natureza física do solo.

A análise investigativa de regressão múltipla demonstrando os efeitos diretos e indiretos investigados na camada rasa (mais impeditiva) sobre atributos associados às funções edáficas controladas pela estrutura do solo (Dsr, K0 e Kear) é apresentada na Tabela 2. Para isto, todos NC e VIFs permaneceram abaixo dos limiares na análise de multicolinearidade, evidenciando ausência de distorções significativas nas estimativas dos coeficientes e que, portanto, são válidos para análise de trilha e ilustrados pelos diagramas causais apresentados na Figura 7. Para a Dsr, apenas o conteúdo de argila do solo nas lavouras avaliadas apresentou correlação moderada e positiva, com alto efeito direto com a variável dependente (84% da correlação total).

Tabela 2. Efeitos diretos, indiretos e correlação de diagrama causal da regressão múltipla na determinação de atributos associados às funções edáficas controladas pela estrutura do solo e em função de aspectos de solo e de agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro.

Variáveis independentes	Efeito				Correlação
	Direto	%	Indireto	%	
Densidade do solo relativa (Dsr)					
IAR	0,24 ^{ns}	--	-0,27 ^{ns}	--	-0,03 ^{ns}
Tempo de adoção	0,09 ^{ns}	--	0,07 ^{ns}	--	0,16 ^{ns}
Argila	0,65**	84	-0,13**	16	0,53**
Condutividade hidráulica saturada (K0)					
Dsr	-0,12 ^{ns}	--	-0,01 ^{ns}	--	-0,13 ^{ns}
IAR	1,00**	82	-0,23**	18	0,78**
Tempo de adoção	0,26 ^{ns}	--	-0,82 ^{ns}	--	-0,55 ^{ns}
Argila	-0,04 ^{ns}	--	0,33 ^{ns}	--	0,29 ^{ns}
Permeabilidade ao ar (Kear)					
Dsr	-0,67**	91	0,07**	9	-0,60**
IAR	-0,18 ^{ns}	--	0,04 ^{ns}	--	-0,14 ^{ns}
Tempo de adoção	0,03 ^{ns}	--	0,02 ^{ns}	--	0,05 ^{ns}
Argila	0,11 ^{ns}	--	-0,44 ^{ns}	--	-0,33 ^{ns}

** significativo a 1% de probabilidade; ^{ns}: não significativo. Dsr obtida a partir de funções de pedotransferência propostas por Rezende *et al.* (2025).

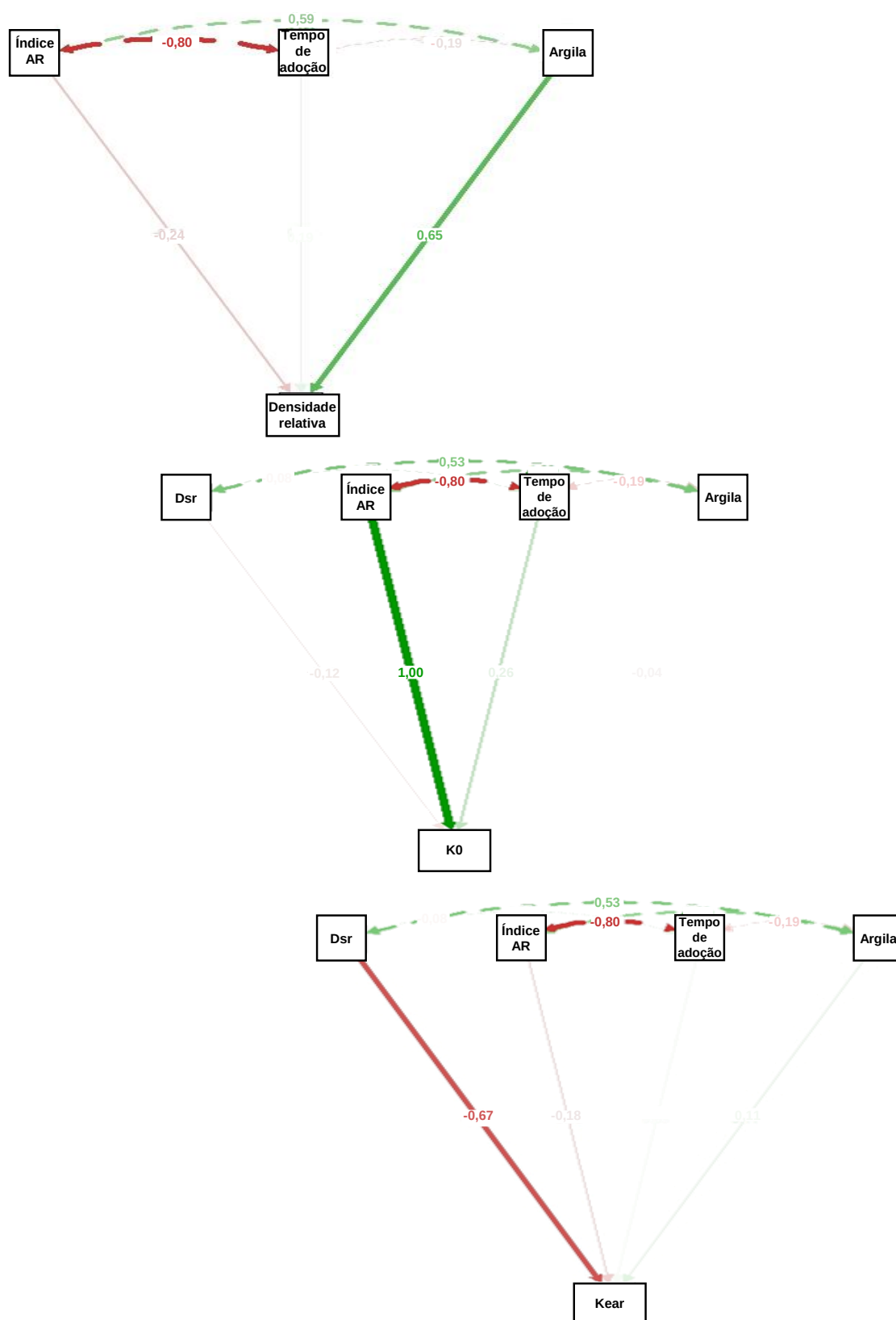


Figura 7. Diagrama causal mostrando as correlações entre as variáveis independentes (linha tracejada) e as relações causa-efeito com atributos associados às funções edáficas controladas pela estrutura do solo (linha cheia) nas variáveis densidade relativa (Dsr), condutividade hidráulica saturada (K0) e permeabilidade ao ar (Kear), em função de aspectos de solo e de agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro.

Para K_0 , a única variável com efeito estatisticamente significativo foi o IAR, apresentando coeficiente de efeito direto (1,00) e representando 82% da correlação total, alta e positiva ($r = 0,78^{**}$). Por fim, em relação à K_{ear} , somente a variável D_{sr} (aqui também tratada como variável independente) demonstrou efeito significativo, sendo o direto (- 0,67) correspondente a 91% de uma correlação total moderada e negativa.

As relações entre as variáveis significativas (Tabela 2) são apresentadas nas figuras 8 (K_0) e 9 (K_{ear}) em função, respectivamente, de IAR e D_{sr} . Observa-se aumento exponencial de K_0 (de 3 mm h^{-1} a cerca de 26 mm h^{-1} , no intervalo avaliado) e redução linear de K_{ear} na magnitude de $35 \mu\text{m}^2 D_{sr}^{-1}$. Nas condições estudadas, e considerando o valor restritivo de densidade relativa ($D_{sr} = 1$), a K_{ear} limitante é, aproximadamente, $12 \mu\text{m}^2$.

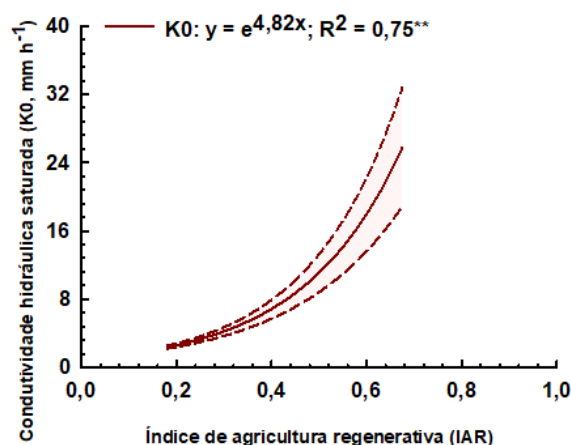


Figura 8. Potencial de recarga hídrica subterrânea mensurada pela condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em função do índice de agricultura regenerativa quantificado a partir das práticas agrícolas adotadas em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.

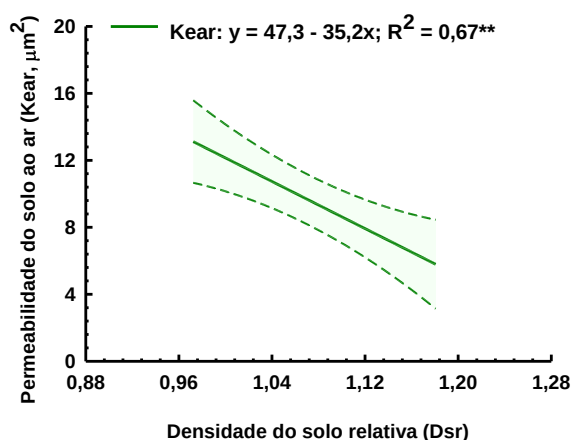


Figura 9. Potencial de trocas gasosas entre solo e atmosfera mensurada pela permeabilidade ao ar (K_{ear}) em função da densidade do solo relativa obtida por funções de pedotransferência* em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.

* Funções desenvolvidas por Rezende *et al.* (2025).

4. DISCUSSÃO

4.1 Camadas de solo de impedimento mecânico

A avaliação *in situ* da resistência à penetração aponta a ocorrência de condições contrastantes no perfil de solo em curta escala espacial e estando os maiores impedimentos em camadas rasas imediatamente abaixo da superfície, ao passo que as camadas profundas apresentaram as menores RP normalizada (Figura 3). Estes resultados levantam a possibilidade de eventual ocorrência da compactação em sistemas agropecuários regenerativos tropicais associada às primeiras camadas do solo, mas também à possibilidade de associação ao histórico de uso antecedentes das lavouras. Embora todas as fazendas analisadas adotem práticas de agricultura regenerativa em diferentes intensidades (Planilha A, material suplementar do anexo B), o tempo de adoção é relativamente curto (2 a 5 anos, Tabela 1).

Estes resultados sugerem que os processos desempenhados atualmente podem ainda não ter eliminado o histórico de uso do sistema de plantio direto adotado anteriormente, e corroboram aos de Ferreira *et al.* (2023), que avaliando um solo tropical brasileiro sob sistema de plantio direto em longa duração, constataram incremento de resistência à penetração imediatamente abaixo da superfície (0,1 m), com valores restritivos em todas as camadas rasas (até 0,3 m). Também estão de acordo aos de Kasirajan *et al.* (2024), que estudando a dinâmica da resistência à penetração do solo cultivado com arroz sob plantio direto na Índia, relataram aumento gradativo nos valores em camadas rasas, em que os maiores valores foram encontrados a 0,15 m.

A resistência à penetração é um indicador da qualidade física do solo de aceitação universal (Benevenuto *et al.*, 2020; Dörner *et al.*, 2022; Kumi *et al.*, 2023; Vanderhasselt *et al.*, 2023; Jug *et al.*, 2025), dada à exequibilidade e capacidade em fornecer resultados instantâneos e em larga escala. Contudo, é sabido que a penetrometria possui limitações metodológicas decorrentes da forte dependência da umidade do solo no momento da avaliação (Moraes *et al.*, 2024) e da dificuldade em controlar este requisito em condições não experimentais ou em pesquisas desenvolvidas em áreas comerciais. Assim, estes resultados obtidos em campo, em condições de umidade do solo na friabilidade, são conclusivos acerca da ocorrência de camadas contrastantes, sem contudo, assegurar pelo menos até o presente momento, alterações estruturais do solo dada a possibilidade da

ocorrência de frentes de umedecimento à sazonalidade climática por ocasião dos testes em campo. Estes fatores são considerados premissa na avaliação *in situ*.

Propomos o uso deste atributo como uma abordagem anamnésica inicial e, por este motivo, apresentamos os resultados normalizados com finalidade descritiva (é impropriedade a comparação de resultados de campo entre fazendas em escala natural, por causa da variabilidade espaço-temporal do clima – adicionalmente, na figura C do material suplementar do anexo B, é apresentada a resistência do solo à penetração, medida em MPa, em todo o perfil agrônômico do solo das fazendas estudadas). Essa estratégia permite identificar as camadas de maior impedimento mecânico e/ou aquelas de maior interesse de investigação e, conseqüentemente, refinar a amostragem para fins de diagnose da estrutura do solo, o que não é possível avaliar profundidades preestabelecidas.

A avaliação *in situ* deve, portanto, ser confirmada por observações de laboratório, cujas condições analíticas são controladas de modo a assegurar a maior confiabilidade da diagnose. Os resultados apresentados na figura 3 condicionaram a amostragem de solo em profundidades compatíveis as três primeiras camadas, dada o comportamento contrastante entre si e coerente aos estudos supracitados acerca do impacto do manejo em sistemas conservacionistas de produção agropecuária. Ademais estas camadas atuam na regulação das relações solo-água-planta-atmosfera (superficial) e, ainda, expressam as maiores impedâncias (rasas). Neste caso, torna-se uma barreira física ao bom desempenho das funções edáficas governadas pela estrutura do solo e ao potencial enraizamento das plantas cultivadas em profundidade, motivo pelo qual essas elucidacões concentraram-se nessa faixa do perfil.

4.2. Caracterização física de pedoambientes de produção em fazendas de agricultura regenerativa no cerrado brasileiro

Os resultados demonstram a capacidade analítica dos atributos físicos avaliados ao considerar as três primeiras dimensões da PCA elucidativas do ambiente físico dos solos e dado aos elevados valores acumulados (Figura 4). Nota-se um antagonismo (correlação negativa) entre variáveis (como entre Ds e PT e entre Mac_Mic e CCr) atestando a clara discriminação entre a superfície do solo e a camada rasa, estando a rasa-moderada sob intermédio e em similaridade à diagnose obtida em campo. Este fato descarta eventuais desuniformidades na umidade do solo em profundidade por ocasião da penetrometria e reforça as considerações de Reynolds *et al.* (2009) no que diz respeito à

forte dependência do estado de compactação do solo com respostas simultâneas nos atributos indicadores da qualidade física do solo.

Ressalta-se, portanto, a forte diferenciação de pedoambientes no perfil do solo, cujas elipses das camadas contrastantes encontram-se em direções opostas e estando a superfície sob maior porosidade, o que favorece a interação com atmosfera, notadamente em termos de infiltração de água e trocas gasosas (Romanoski *et al.*, 2025). Por outro lado, estes mesmo processos poderão ser restringidos na camada subsequente (rasa) e ainda, trazendo consequências ao crescimento, desenvolvimento e, por conseguinte a capacidade produtiva das plantas, dado à provável compactação do solo expressa pelo aumento em CCr e Ds, o que corrobora as investigações acerca do comportamento compressivo de solos da mesma região realizados por Severiano *et al.* (2013) e Rezende *et al.* (2025).

A PCA demonstra, ainda, a contribuição diferencial das variáveis estudadas em cada dimensão (Figura 5), mas com destaque para os atributos do sistema poroso do solo na acumulada (Figura 5D). Estes achados ressaltam a solidez destes atributos e corroboram com Peixoto *et al.* (2022) que, ao estudarem o processo de compactação, verificaram que a macroporosidade, a porosidade total e a microporosidade são os mais relevantes para prever os impactos das práticas agrícolas na qualidade do solo e no rendimento agrícola. Considerando estes resultados e amparados pelas pesquisas supracitadas, a macroporosidade do solo, por dispor de alta confiabilidade, têm aceitação consolidada na literatura internacional (Grable & Siemer, 1968; Gupta & Allmaras, 1987; Müller *et al.*, 2018; Tan *et al.*, 2025).

Por outro lado, faz-se necessária cautela na interpretação destes resultados. Isto por que as fazendas regenerativas encontravam sobre solos que, embora de mesma classificação taxonômica (Santos *et al.*, 2025) e dotados de elevada uniformidade morfológica e estrutural, apresentaram ampla variação textural (de 456 a 830 g kg⁻¹ de argila, Tabela 1). Esta característica, segundo Severiano *et al.* (2013), é regulatória de fenômenos ligados à área superficial específica das partículas sólidas como a adsorção e a capilaridade (logo, as relações hídricas solo). Por estes motivos, todos os atributos avaliados tiveram elevadas contribuições (scores acumulados superiores a 0,88 em todas as variáveis, até a terceira dimensão - Figura 5D) por serem, provavelmente, respostas diretas ao manejo (diferenças entre as camadas) e à textura do solo [este é, sem dúvida, o principal fator que afeta a retenção de água em solos tropicais, conforme apontado por Rezende *et al.* (2025)].

O desafio passa, portanto, na definição de atributos diagnósticos e seus valores de referência que, na investigação de solos contrastantes, apresentem acuracidade e robustez. Sob esta premissa, o grau de compactação do solo, ou densidade relativa (D_{sr} , Eq. 4), é apontado por Reichert *et al.* (2009) como o atributo mais adequado para avaliar alterações estruturais decorrentes do uso e manejo do solo. Entretanto, a definição de limites críticos de densidade do solo de referência (D_{sref}) deve considerar as múltiplas funções ecossistêmicas reguladas pela estrutura do solo, além de representar a heterogeneidade pedológica existente entre diferentes propriedades, permitindo comparações eficazes das práticas agrícolas adotadas.

Considerando esses aspectos, propõe-se o uso de uma função de pedotransferência, desenvolvida para solos tropicais por Rezende *et al.* (2025) e que atua como fator de correção da textura do solo, associadas ao valor limitante de $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ da macroporosidade (Vomocil & Flocker, 1961) como a estratégia mais consistente e racional para avançar na avaliação das alterações estruturais e da compactação do solo. Dessa forma, a discussão a seguir aborda a qualidade física dos solos com base na própria D_{sr} ou nos resultados de argila e densidade do solo, correspondendo às variáveis independente e dependente, respectivamente, no procedimento.

4.3. Diagnóstico da compactação do solo

A diagnose da compactação do solo baseada tão só na redução da macroporosidade a valores inferiores a limitante, ressalta os processos de degradação estrutural como consequência do manejo inadequado (que, por sua vez, será a precursora da erosão, interrupção do ciclo hidrológico e, consequentemente, assoreamento e eutrofização de águas superficiais). Em contrapartida, a diagnose deve contemplar não somente os prejuízos advindos do manejo inadequado, mas também apresentar capacidade em quantificar melhorias advindas das boas práticas agrícolas.

Ademais, a compactação do solo nem sempre é prejudicial, particularmente em ambientes tropicais altamente intemperizados (Rezende *et al.*, 2025) e isto foi demonstrado por Silva *et al.* (2021), que avaliando as consequências deste problema na performance de sistemas integrados de produção agropecuária, constataram que uma leve compactação é benéfica por prover melhorias na retenção de água sem, contudo, comprometer as trocas gasosas e o metabolismo edáfico aeróbico. Estes aspectos também foram observados por Carducci *et al.* (2013), que estudando sistema conservacionista com a adoção de práticas da agricultura regenerativa em cultivo de café, constataram que

uma leve compactação aumenta a disponibilidade hídrica em solos oxídicos altamente intemperizados.

Contemplar as condições estruturais do solo que asseguram a atribuição de componente essencial no meio ambiente e ainda sustente a produção agropecuária constitui o propósito desta avaliação do estado estrutural do solo. As funções de pedotransferência desenvolvidas por Rezende *et al.* (2025) representam um avanço metodológico por permitir, a partir de atributos de fácil mensuração (Ds e argila) avaliar a plena qualidade física do solo considerando os respectivos valores de referência: (1) solo perturbado, em condições de densidade do solo inferior a inicial; (2) sem compactação, para a faixa de densidade do solo entre inicial e benéfica; (3) com compactação limitante, quando supera a densidade do solo limitante e alcança a densidade do solo crítica e; (4) compactação severa, quando supera valores de Dsc, conforme pode ser visualizado, respectivamente, pelas colorações em verde, amarela, laranja e vermelho na figura 2. Adicionalmente, os métodos analíticos executados na determinação da densidade do solo são reconhecidos pela acurácia e precisão, refletindo a estrutura do solo em todos os seus aspectos (Borges & Pires, 2012; Severiano *et al.*, 2013).

Considerando este critério, e com acuracidade atestada (planilha B, material suplementar, Anexo B), a figura 6 atesta a boa condição estrutural na camada superficial, com todas as fazendas estudadas classificadas com o critério de “sem compactação”. Os resultados estão em concordância à pesquisa conduzida por Xu *et al.* (2019), que analisando a dinâmica da compactação do solo submetido a práticas regenerativas, observaram expressiva redução na densidade do solo nesta camada. Os autores atribuíram este fato ao incremento dos conteúdos orgânicos, que é o agente de estabilização dos agregados do solo e ativador de processos biológicos, tanto na microbiota como da macrofauna, também relacionados à melhoria da qualidade física do solo (Marchão *et al.*, 2009; Serafim *et al.*, 2023).

Corroborando as discussões anteriores, tal efeito pode ser intensificado pelo mecanismo de abertura de sulcos de semeadura por ocasião das operações de plantio (Ferreira *et al.*, 2023) considerando a perturbação mínima do solo e restrita à esta posição (Brown, 2018), ou mesmo pela manutenção de raízes vivas quando da inserção de plantas de cobertura com ação descompactadora em rotação de culturas (Silva *et al.*, 2019; 2021; Lima *et al.*, 2023; 2024).

Entretanto, esse comportamento não se mantém nas camadas rasas, estando todas as fazendas com os solos compactados, embora uma não apresente compactação na

camada rasa e duas em rasa-moderada (Figura 6). Tais fatos confirmam a presença generalizada da degradação física e coloca em risco a sustentabilidade agrônômica por representar uma barreira ao pleno enraizamento das culturas no perfil de solo com a maior vulnerabilidade ao déficit hídrico decorrente de irregularidades climáticas (Lima *et al.*, 2024). Por outro lado, estes resultados não surpreendem, dada a alta suscetibilidade desses solos (Severiano *et al.*, 2013; Rezende *et al.*, 2025). Segundo os autores, os Latossolos do cerrado Brasileiro são os solos mais suscetíveis a este problema no mundo, sendo um processo inevitável quando inseridos no processo produtivo, particularmente nos argilosos e muito argilosos.

Cabe ressaltar que todas as fazendas estudadas provêm de um sistema de produção intensivo que contribuiu por anos para a degradação dos solos em questão, e somente nas últimas safras foram convertidos aos sistemas regenerativos. Faz-se necessário, portanto, quantificar os efeitos do tempo de adoção na melhoria física dos solos e, emerge uma informação relevante acerca da ocorrência dessa problemática, em geral nas camadas rasas, possibilitando a reversão mediante a consolidação e o aprimoramento das práticas adotadas nesta modalidade agropecuária. Tal manejo tem o potencial de recuperação de solos fisicamente degradados nas profundidades em questão (Calonego *et al.*, 2017; Gabriel *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021; Parvin *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2024).

Em adição, a diagnose da compactação do solo realizada em campo (Figura 3) apresenta coerência a aquela mensurada em laboratório (Figuras 4 e 5), como elucidado na relação apresentada na Figura C do material suplementar, anexo B. A normalização dos resultados, tanto de RP quanto de Ds, possibilita a mensuração do manejo do solo em fazendas contrastantes e, ainda, indica a RP de campo restritiva quando os valores relativos superarem 0,72. Com base neste critério, espera-se que as camadas profundas do perfil não apresentem qualquer impedimento, dados valores encontrados serem sempre inferiores a este.

4.4. Agricultura regenerativa e funções edáficas governadas pela estrutura do solo

A alta confiabilidade da diagnose da compactação do solo obtida pelas funções de pedotransferência de Rezende *et al.*

(2025) (Figura 6; Planilha B do material suplementar, Anexo B) destaca a degradação física generalizada das camadas rasas nas fazendas estudadas, conotando uma provável ineficácia dos princípios do manejo regenerativo. Para refinar estas

investigações, foram estabelecidas relações causais entre as práticas adotadas pelos fazendeiros e características intrínsecas do solo e os três atributos físicos associados às funções edáficas controladas pela estrutura do solo. Aqui, a densidade relativa (Dsr) foi considerada o indicador de alterações estruturais decorrentes do manejo adotado, portanto da matriz sólida do solo (Håkansson, 1990; Reichert *et al.*, 2009; Rezende *et al.*, 2025). Em adição, K0 foi definida como precursora das relações hídricas e Kear da capacidade de aeração do solo.

Embora a adoção de práticas regenerativas desempenha a expectativa dos fazendeiros na recuperação física de solos previamente degradados pelo manejo inadequado, os resultados não estabelecem relações entre IAR e Dsr, tampouco com Kear (apenas com K0, cuja correlação foi altamente positiva, Tabela 2). Por sua vez, o reduzido tempo de implantação destas práticas, talvez, não tenha sido o suficiente para afetar os atributos avaliados, reforçando as afirmações acerca do histórico de degradação prévia dos solos. Em contrapartida, a eficiência desta na restauração da qualidade edáfica tem sido confirmada por estudos em diversas partes do mundo. Em concordância, Xu *et al.* (2019) analisando a eficácia de práticas regenerativas em um solo arenoso, atestaram melhoria estrutural mensurada pela expressiva redução densidade do solo e incremento significativo de matéria orgânica e nas relações hídricas do solo com apenas 1,5 ano de adoção.

Entretanto, isto não se confirmou nestes resultados, cujas melhorias restringiram-se apenas à camada superficial. Isto não deve ser caracterizado como uma ineficiência da agricultura regenerativa, mas sim uma demonstração da complexidade envolvida na recuperação, ou mesmo na manutenção da qualidade física de solos tropicais, dada a elevada suscetibilidade dos mesmos à degradação (Silva *et al.*, 2021). Este fato, atestado pelo alto efeito direto da correlação moderada positiva entre o conteúdo de argila e Dsr e moderada negativa entre Dsr e Kear (Tabela 2), reforça efetivamente a altíssima suscetibilidade à compactação dos solos argilosos e muito argilosos, vistos no tópico anterior e alertada por Severiano *et al.* (2013).

Adicionalmente, é necessário ressaltar que os fazendeiros, de forma unânime, não adotaram o princípio da diversidade da produção e obtiveram pontuação zero nesse quesito (planilha A; material suplementar no anexo B). Este fato é compreensivo, principalmente por considerar o alto custo e o risco da agricultura tropical, condicionando a tomada de decisão pelo cultivo de algum cereal (no Brasil, o milho) na segunda safra dada a liquidez e rentabilidade da referida cultura. Em contraposição, a inserção de

espécies com sistemas radiculares distintos, por sua vez, promove a formação de bioporos e a incorporação de carbono orgânico ao perfil edáfico (Villarreal *et al.*, 2021; Quigley & Kravchenko, 2022; Engedal *et al.*, 2023), o que impacta o arranjo de sistema poroso (Villarreal *et al.*, 2021; Araya *et al.*, 2022; Rankoth *et al.*, 2022; Kaur *et al.*, 2024).

De modo otimista, Ashworth *et al.* (2017) e Blanco-Canqui & Ruis (2018) identificaram benefícios às propriedades físicas do solo quando práticas regenerativas são incorporadas ao sistema de plantio direto, como a integração lavoura-pecuária, o uso de culturas de cobertura com plantas forrageiras descompactadoras (Lima *et al.*, 2024) ou, ainda, a incorporação de esterco animal (os resultados apontam as fazendas F4 e F6 como as de melhores qualidades física do solo e sendo as duas que utilizam compostagem de esterco bovino). Estes sistemas, além de integrar todos os princípios da agricultura regenerativa (Brown, 2018), promovem a verticalização da produção, a diversificação dos cultivos e a maior estabilidade econômica (Dias *et al.*, 2021), fazendo com que produzir e conservar possam ser objetivos convergentes.

Nesse sentido, há vários relatos na literatura demonstrando assertividade dos planos de rotação de culturas na mitigação de camadas impeditivas, cujas aplicações vão da promoção da agregação (Gentsch *et al.*, 2024) à descompactação biológica do solo (Chen & Weil, 2010; Burr-Hersey *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2019). Entretanto, quando da consorciação do milho com alguma planta forrageira, incluindo àquelas com habilidades descompactadoras (Silva *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2023), é realizado um manejo de supressão do capim com uso de herbicidas (Freitas *et al.*, 2018) que, por sua vez causa distúrbios fisiológicos na planta e paralização da expressão do seu potencial genético.

Embora este sistema seja capaz de manter as raízes vivas da planta consorciada durante toda a entressafra, a competição somente se finda após a colheita da cultura principal, ocasião em que a época seca já tenha se estabelecido. Assim, é limitado a atuação dos sistemas consorciados como agente de diversificação de cultivos (reconheceram o fato dos sistemas consorciados representarem maior diversidade em relação àqueles em monocultivo mas, pelos motivos supracitados, enquadraram no princípio relacionado à manutenção de raízes sempre vivas – o enquadramento nos dois princípios causaria distorção nas pontuações das práticas regenerativas e provocaria, provavelmente, efeito e multicolinearidade na análise estatística dos resultados).

Todos estes aspectos demonstram não apenas a necessidade de aprimoramento nas práticas regenerativas utilizadas nas fazendas estudadas, mas também destaca o fato que no cultivo sob solos tropicais argilosos e muito argilosos, a rotação de culturas deve ser

priorizada quando se busca efeitos benéficos sobre a qualidade física do solo. Isso implica que os efeitos sinérgicos advindos das combinações de diversas culturas intensificam à medida que aumenta a diversidade morfológica do sistema radicular (Francziskowski *et al.*, 2019; Pott *et al.*, 2023), em virtude da exploração mais abrangente e diferenciada das distintas camadas do solo (Kemper *et al.*, 2020). Tal dinâmica favorece as melhorias esperadas (Ren *et al.*, 2019; Çerçioğlu *et al.*, 2019).

Por outro lado, os esforços destes fazendeiros brasileiros apontam o cumprimento, ou ao menos, o começo da regeneração do solo como componente essencial no meio ambiente em serviços ecossistêmicos, dado ao maior potencial de recarga hídrica subterrânea mensurada pela condutividade hidráulica do solo saturado quando da maior adoção de práticas agrícolas regenerativas (Tabela 2; Figura 7). Este fato assume relevância ainda maior ao considerar as preocupações de Valani *et al.* (2022) e Romanoski *et al.* (2025), acerca do desconhecimento da ação das práticas combinadas na condutividade hidráulica saturada do solo.

Os resultados sugerem uma ativação biológica do solo com a intensificação do IAR e maior desenvolvimento de bioporos tanto de origem vegetal (decorrentes da decomposição das raízes de cultivos antecedentes e mantidos quando da perturbação física mínima do solo) quanto por galerias desenvolvidas pela fauna edáfica, estes constituem rotas preferenciais para infiltração de água no solo. Esse aumento na porosidade favorece a condutividade hidráulica do solo (Çerçioğlu *et al.*, 2019; Pulido-Moncada *et al.*, 2021; J. Chen *et al.*, 2021; Pott *et al.*, 2023) e reforça as considerações de Lehmann *et al.* (2017) acerca da atividade faunística associada à manutenção de resíduos na superfície na contribuição da infiltrabilidade do solo.

No entanto, a euforia estatística proporcionada pelo ajuste exponencial da variável resposta é contraposta aos reduzidos valores encontrados (Figura 8), cuja classificação de K0 varia de lenta à moderadamente lenta, muito aquém do requerido para assegurar a infiltração de água advinda das precipitações e a recarga hídrica subterrânea (consequentemente, a manutenção das nascentes associadas às paisagens rurais brasileiras).

Em termos de potencial de trocas gasosas, os resultados encontrados de Kear reforçam as considerações descritas em literatura que, em solos tropicais altamente intemperizados, a aeração somente é comprometida em condições de extrema degradação física ou ainda em escala temporal efêmera, após intensas precipitações e no período em que o conteúdo de água no solo se encontrar acima da capacidade de campo, dado o

comportamento dinâmico da água no solo (Silva *et al.*, 2021). Isto por que, Kear encontrado para a condição estrutural limítrofe ($D_{sr} = 1$) foi de $12,0 \mu\text{m}^2$ e, ainda, superior a $4,0 \mu\text{m}^2$ na pior condição estrutural avaliada e correspondente à compactação severa (Figura 9), superando em muito o limite de $1,0 \mu\text{m}^2$ considerado crítico para oxigenação das raízes (McQueen & Shepherd, 2002). Este atributo reflete primariamente a continuidade e conectividade dos poros do solo que reafirma o caráter poroso dos Latossolos Vermelhos, cuja mineralogia predominantemente oxídica e estrutura tipo granular confere com solo elevada estabilidade estrutural e friabilidade, refletindo a aglutinação da fração sólida do solo e o espaço vazio interconectado (Reatto *et al.*, 2009; Severiano *et al.*, 2013).

Por fim, ressalta-se que o intuito deste estudo não se baseia em uma crítica às práticas dos agricultores participantes, mas sim em um reconhecimento de seus esforços na busca por um modelo de agricultura mais sustentável, que mitigue as mudanças climáticas e reconstrua a qualidade edáfica. Expressando esse reconhecimento por meio de contribuições científicas e almejando que o pioneirismo deste estudo encoraje a adesão à agricultura regenerativa não somente no Cerrado brasileiro, mas também nas demais regiões tropicais produtoras no mundo.

5. CONCLUSÕES

Apesar dos avanços iniciais promovidos pelas práticas de agricultura regenerativa adotadas nas fazendas avaliadas, a degradação física do solo ainda persiste, sobretudo nas camadas rasas. A curta duração da implantação das práticas regenerativas e, provavelmente aliada à ausência do princípio da diversificação de cultivos, limitou os efeitos restauradores esperados nestes solos argilosos e altamente suscetíveis à compactação. Ainda assim, melhorias estruturais na camada superficial e aumento da condutividade hidráulica saturada sugerem um início de recuperação, principalmente impulsionado pelo possível incremento de matéria orgânica e pela ativação biológica do solo. A permeabilidade ao ar, por sua vez, manteve-se satisfatória mesmo em condições estruturais adversas, reiterando a alta estabilidade estrutural e friabilidade dos Latossolos do Cerrado. Portanto, a agricultura regenerativa possui alto potencial para restaurar a qualidade física dos solos tropicais, desde que acompanhada por estratégias de manejo integradoras em todos os seus princípios. Esses avanços são essenciais para garantir sistemas agrícolas resilientes, ambientalmente sustentáveis e produtivamente viáveis nas regiões tropicais.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao aluno de iniciação científica que realizou as amostragens de campo: João Subtil da Silva Neto; aos pesquisadores Dr. Alexandre Garcia Rezende e Dr. Eduardo da Costa Severiano; aos fazendeiros e funcionários das fazendas que possibilitaram o nosso trabalho. À Cargill pelo financiamento e ao Instituto BioSistêmico pela gestão do Projeto Regenera Cerrado. Às instituições de pesquisa, parceiras no Projeto: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig), Grupo Associado de Agricultura Sustentável (GAAS), Grupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano (GAPES), Instituto Federal Goiano, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Universidade de Brasília (UnB).

7. REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Anghinoni, G., Anghinoni, F. B. G., Tormena, C. A., Braccini, A. L., de Carvalho Mendes, I., Zancanaro, L., & Lal, R. (2021). Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. *Land Use Policy*, 108, 105591. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105591>
- Ashworth, A. J., DeBruyn, J. M., Allen, F. L., Radosevich, M., & Owens, P. R. (2017). Microbial community structure is affected by cropping sequences and poultry litter under long-term no-tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 114, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.07.019>
- Barbosa, J. Z., Poggere, G., Corrêa, R. S., Hungria, M., & Mendes, I. de C. (2023). Soil enzymatic activity in Brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. *Applied Soil Ecology*, 190, 105014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105014>

- Basso, M. F., Neves, M. F., & Grossi-de-Sa, M. F. (2024). Agriculture evolution, sustainability and trends, focusing on Brazilian agribusiness: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1296337>
- Battisti, R., Ferreira, M. D. P., Tavares, É. B., Knapp, F. M., Bender, F. D., Casaroli, D., & Alves Júnior, J. (2020). Rules for grown soybean-maize cropping system in Midwestern Brazil: Food production and economic profits. *Agricultural Systems*, 182, 102850. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102850>
- Benevenute, P. A. N., Morais, E. G. de, Souza, A. A., Vasques, I. C. F., Cardoso, D. P., Sales, F. R., Severiano, E. C., Homem, B. G. C., Casagrande, D. R., & Silva, B. M. (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, 117, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Borges, J. A. R., & Pires, L. F. (2012). Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 123, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.008>
- Botelho, H. A., Lago, A., da Costa, A. L., Costa, A. C., Reis Neto, R. V., Silva, Z., Ribeiro, F. M., Café, M. B., & de Freitas, R. T. F. (2019). Application of morphometric measures in estimation of body weight and discrimination of *Astyanax lacustris* and *Astyanax fasciatus*. *Aquaculture Research*, 50(9), 2429–2436. <https://doi.org/10.1111/are.14196>
- Brown, G. (2018). *Dirt to soil: One family's journey into regenerative agriculture*. Chelsea Green Publishing.
- Burr-Hersey, J. E., Mooney, S. J., Bengough, A. G., Mairhofer, S., & Ritz, K. (2017). Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PLOS ONE*, 12(7), e0181872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181872>
- Calonego, J. C., Raphael, J. P. A., Rigon, J. P. G., Oliveira Neto, L. de, & 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Camargo, F. A. O., Silva, L. S., Merten, G. H., Carlos, F. S., Baveye, P. C., & Triplett, E. W. (2017). *Brazilian Agriculture in Perspective* (pp. 53–114). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.003>
- Carducci, C. E., Oliveira, G. C. de Zeviani, W. M., Lima, V. M. P., & Serafim, M. E. (2013). Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. *Engenharia Agrícola*, 33(2), 291–302. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>
- Çerçioğlu, M., Anderson, S. H., Udawatta, R. P., & Alagele, S. (2019). Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 343, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.027>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1–2), 31–43. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>
- Chen, J., Wu, Z., Zhao, T., Yang, H., Long, Q., & He, Y. (2021). Rotation crop root performance and its effect on soil hydraulic properties in a clayey Ustisol. *Soil and Tillage Research*, 213, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105136>
- Cruz, C. D., Carneiro, P. C. S., & Regazzi, A. J. (2014). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético* (Vol. 2). Rev. Viçosa.
- Dias, M. B. D. C., Costa, K. A. D. P., Severiano, E. D. C., Bilego, U. O., Vilela, L., de Souza, W. F., ... & da Silva, A. C. G. (2022). Cattle performance with *Brachiaria* and *Panicum maximum* forages in an integrated crop-livestock system. *African Journal of Range & Forage Science*, 39(2), 230–243. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1901311>
- Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., Horn, R., Uteau, D., Wendroth, O., Lagos, L., & Zúñiga, F. (2022). Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research*, 221, 105396. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105396>
- Fenster, T. L. D., LaCanne, C. E., Pecenka, J. R., Schmid, R. B., Bredeson, M. M., Busenitz, K. M., Michels, A. M., Welch, K. D., & Lundgren, J. G. (2021). Defining

- and validating regenerative farm systems using a composite of ranked agricultural practices. *F1000Research*, 10, 115. <https://doi.org/10.12688/f1000research.28450.1>
- Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Severiano, E. C., Nunes, M. R., Menezes, C. C. E. de Antille, D. L., & Preto, V. R. de O. (2023). Effectiveness of narrow tyne and double-disc openers to overcome shallow compaction and improve soybean yield in long-term no-tillage soil. *Soil and Tillage Research*, 227, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105622>
- Francziskowski, M. A., Seidel, E. P., Fey, E., Anschau, K. A., & Mottin, M. C. (2019). Propriedades físicas do solo no sistema de plantio direto e preparo reduzido, cultivado com plantas de cobertura. *Revista engenharia na agricultura - REVENG*, 27(6), 556–564. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i6.966>
- Freitas, M. A. M., Silva, D. V., Guimarães, F. R., Leal, P. L., de Souza Moreira, F. M., da Silva, A. A., & de Freitas Souza, M. (2018). Biological attributes of soil cultivated with corn intercropped with *Urochloa brizantha* in different plant arrangements with and without herbicide application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.026>
- Gabriel, J. L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D., & Vanclooster, M. (2019). Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. *Agricultural Water Management*, 222, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.034>
- Gentsch, N., Riechers, F. L., Boy, J., Schweneker, D., Feuerstein, U., Heuermann, D., & Guggenberger, G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL*, 10(1), 139–150. <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>
- Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, 50(1), 13–25. <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>
- Grable, A. R., & Siemer, E. G. (1968). Effects of Bulk Density, Aggregate Size, and Soil Water Suction on Oxygen Diffusion, Redox Potentials, and Elongation of Corn Roots. *Soil Science Society of America Journal*, 32(2), 180–186. <https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x>

- Gupta, S. C., & Allmaras, R. R. (1987). *Models to Assess the Susceptibility of Soils to Excessive Compaction* (pp. 65–100). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_2
- Håkansson, I. A. (1990) method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, 16, 105-120. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90024-8)
- J. A. Vomocil and W. J. Flocker. (1961). Effect of Soil Compaction on Storage and Movement of Soil Air and Water. *Transactions of the ASAE*, 4(2), 0242–0246. <https://doi.org/10.13031/2013.41066>
- Jaworski, C. C., Krzywoszynska, A., Leake, J. R., & Dicks, L. V. (2024). Sustainable soil management in the <scp>United Kingdom</scp>: A survey of current practices and how they relate to the principles of regenerative agriculture. *Soil Use and Management*, 40(1). <https://doi.org/10.1111/sum.12908>
- Jug, D., Radočaj, D., Jug, I., Jurišić, M., Brozović, B., Ivelic-Sáez, J., Wilczewski, E., Dörner, J., & Đurđević, B. (2025). Soil penetration resistance prediction based on a comparative evaluation of individual and ensemble machine learning under varying tillage, fertilization and liming treatments. *Soil and Tillage Research*, 254, 106720. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106720>
- Kasirajan, S., Parthipan, T., Elamathy, S., Kumar, G. S., Rajavel, M., & Veeramani, P. (2024). Dynamics of soil penetration resistance, moisture depletion pattern and crop productivity determined by mechanized cultivation and lifesaving irrigation in zero till blackgram. *Heliyon*, 10(7), e28625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28625>
- Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2019). Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), 29–51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Kemper, R., Bublitz, T. A., Müller, P., Kautz, T., Döring, T. F., & Athmann, M. (2020). Vertical Root Distribution of Different Cover Crops Determined with the Profile Wall Method. *Agriculture*, 10(11), 503. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110503>
- Kumi, F., Obour, P. B., Arthur, E., Moore, S. E., Asare, P. A., Asiedu, J., Angnuureng, D. B., Atiah, K., Amoah, K. K., Amponsah, S. K., Dorvlo, S. Y., Banafo, S., & Adu, M. O. (2023). Quantifying root-induced soil strength, measured as soil penetration

- resistance, from different crop plants and soil types. *Soil and Tillage Research*, 233, 105811. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105811>
- LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 6, e4428. <https://doi.org/10.7717/peerj.4428>
- Lehmann, A., Weishuang Zheng, & Matthias C. Rillig. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature ecology & evolution*. *Nature ecology & evolution*, 1(12), 1828–1835.
- Lima, J. D. P., Silva, J. F. G., Linhares, A. J. de S., Costa, K. A. de P., Ferreira, C. J. B., & Severiano, E. da C. (2024). Crop-livestock integration systems mitigate soil compaction and increase soybean yield. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 47(1), e69446. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v47i1.69446>
- Lima, J. D. P., Torino, A. B., Silva, L. M. da, Nascimento Júnior, L. F. do, Brito, M. F. de, Costa, K. A. de P., Silva, B. M., & Severiano, E. da C. (2023). Crop-Livestock Integration Improves Physical Soil, Agronomic and Environmental Aspects in Soybean Cultivation. *Plants*, 12(21), 3746. <https://doi.org/10.3390/plants12213746>
- Lopes, A. S., & Guimarães Guilherme, L. R. (2016). *A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil* (pp. 1–72). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- Marchão, R. L., Lavelle, P., Celini, L., Balbino, L. C., Vilela, L., & Becquer, T. (2009). Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(8), 1011–1020. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800033>
- Marques, J. J., Schulze, D. G., Curi, N., & Mertzman, S. A. (2004). Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, 119(3–4), 179–195. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00260-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00260-X)
- McKenzie, B. M., & Dexter, A. R. (1996). Methods for Studying the Permeability of Individual Soil Aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65(1), 23–28. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0076>

- McQueen, D. J., & Shepherd, T. G. (2002). Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 63(3–4), 93–107. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00231-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00231-8)
- Moraes, M. T. de Olbermann, F. J. R., Bonetti, J. de A., Pilegi, L. R., Costa, M. V. R., Pacheco, V., Rogers, C. D., & Guimarães, R. M. L. (2024). The impacts of cover crop mixes on the penetration resistance model of an Oxisol under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 242, 106138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106138>
- Müller, K., Katuwal, S., Young, I., McLeod, M., Moldrup, P., de Jonge, L. W., & Clothier, B. (2018). Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures. *Geoderma*, 313, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.020>
- Nóia Júnior, R. de S., & Sentelhas, P. C. (2019). Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, 173, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>
- Parvin, S., Condon, J., & Rose, T. (2023). Rooting depth and water use of summer cover crops in a semi-arid cropping environment. *European Journal of Agronomy*, 147, 126847. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126847>
- Peixoto, D. S., Silva, S. H. G., Moreira, S. G., Silva, A. A. P. da, Chiarini, T. P. A., Silva, L. de C. M. da, Curi, N., & Silva, B. M. (2022). Machine learning as a useful tool for diagnosis of soil compaction under continuous no-tillage in Brazil. *Soil Research*, 61(2), 145–158. <https://doi.org/10.1071/SR22048>
- Piras, S., Wesz, V. J., & Ghinai, S. (2021). Soy Expansion, Environment, and Human Development: An Analysis across Brazilian Municipalities. *Sustainability*, 13(13), 7246. <https://doi.org/10.3390/su13137246>
- Pott, C. A., Conrado, P. M., Rampim, L., Umburanas, R. C., Conrado, A. M. C., Outeiro, V. H., & Müller, M. M. L. (2023). Mixture of winter cover crops improves soil physical properties under no-tillage system in a subtropical environment. *Soil and Tillage Research*, 234, 105854. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105854>
- Prado, L. G., Habermann, E., Costa, K. A. de P., da Silva, L. M., Costa, J. V. C. P., da Costa Severiano, E., Costa, A. C., Silva, J. A. G. e, Vilela, L., Silva, F. G., & Martinez,

- C. A. (2025). Impact of different *Brachiaria ruziziensis* management practices in a crop-livestock integration system on soil health, soybean physiology, and yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 393, 109808. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109808>
- Reatto, A., Bruand, A., de Souza Martins, E., Muller, F., da Silva, E. M., de Carvalho, O. A., Brossard, M., & Richard, G. (2009). Development and origin of the microgranular structure in latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. *Catena*, 76(2), 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.003>
- 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 and Tillage Research*, 102(2), 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Ren, L., Nest, T. Vanden, Ruyschaert, G., D'Hose, T., & Cornelis, W. M. (2019). Short-term effects of cover crops and tillage methods on soil physical properties and maize growth in a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.026>
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3–4), 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., & Tan, C. S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146(3–4), 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Rezende, A. G., Souza, I. R. M. de, Fonseca, C. M., Delmod, J. G., Silva, E. A., Costa, K. A. de P., & Severiano, E. da C. (2025). Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: Implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions. *Geoderma*, 459, 117395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117395>
- Ribeiro, M. G., Costa, K. A. D. P., Souza, W. F. de Cruvinel, W. S., Silva, J. T. da, & Santos Júnior, D. R. dos. (2017). &Silage quality of sorghum and &Urochloa brizantha& cultivars monocropped or intercropped in different planting

- systems. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 39(3), 243. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v39i3.33455>
- Romanoski, V. S., de Oliveira, L. B., Figueiredo, G. C., Mayer, M. A., & Cavalieri-Polizeli, K. M. V. (2025). Dynamic soil hydraulic properties in regenerative agriculture: Effects of crop and forest integration in livestock systems. *Soil and Tillage Research*, 253, 106680. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106680>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, K. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2025). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (Embrapa Solos, Ed.; 6th ed.).
- Schnug, E., Heym, J., & Achwan, F. (1996). Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (bolides). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27(13–14), 2739–2748. <https://doi.org/10.1080/00103629609369736>
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., & Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, 153(8), 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- Serafim, M. E., Mendes, I. C., Wu, J., Ono, F. B., Zancanaro, L., Valendorff, J. D. P., Zeviani, W. M., Pierangeli, M. A. P., Fan, M., & Lal, R. (2023). Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till Systems in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment*, 862, 160674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160674>
- Severiano, E. da C., César de Oliveira, G., Junior, M. de S. D., Curi, N., Costa, K. A. de P., & Carducci, C. E. (2013). Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, 51(3), 193. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Severiano, E. da C., Oliveira, G. C. de, Dias Júnior, M. de S., Costa, K. A. de 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. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300013>

- Sherwood, S., & Uphoff, N. (2000). Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 85–97. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00074-3)
- Silva, Á. P. da, Leão, T. P., Tormena, C. A., & Gonçalves, A. C. A. (2009). Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 33(6), 1535–1545. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600003>
- Silva, J. F. G., Gonçalves, W. G., Costa, K. A. de P., Flávio Neto, J., Brito, M. F. de, Silva, F. C. da, & Severiano, E. da C. (2019). Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(6Supl2), 2973. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl2p2973>
- Silva, J. F. G., Goncalves, W. G., De Pinho Costa, K. A., Neto, J. F., De Brito, M. F., Da Silva, F. C., & Da Costa Severiano, E. (2019). Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(6), 2973–2990. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl2p2973>
- Silva, J. F. G., Linhares, A. J. de S., Gonçalves, W. G., Costa, K. A. de P., Tormena, C. A., Silva, B. M., Oliveira, G. C. de, & Severiano, E. da C. (2021). Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? *Soil and Tillage Research*, 208, 104873. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104873>
- Stolf, R., Fernandes, J., & Furlani Neto, V. L. (1983). Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. *Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR*, 9.
- Tan, J., Si, B., Zhao, Y., Lu, Y., Chen, Y., An, N., Li, S., Wang, W., Fu, H., Han, W., & Yi, Y. (2025). Short-term no-tillage improves soil water retention and maintains soil aeration at high moisture conditions despite reduced macroporosity. *Soil and Tillage Research*, 253, 106677. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106677>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed.). Embrapa.
- Tittonell, P., El Mujtar, V., Felix, G., Kebede, Y., Laborda, L., Luján Soto, R., & de Vente, J. (2022). Regenerative agriculture—agroecology without politics? *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.844261>

- USDA, 2014. Keys to soil taxonomy. *Soil Conserv. Serv.* 12, 410.
- Valani, G. P., Martini, A. F., Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. de C., & Cooper, M. (2022). Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, 220, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>
- Vanderhasselt, A., Cool, S., D'Hose, T., & Cornelis, W. (2023). How tine characteristics of subsoilers affect fuel consumption, penetration resistance and potato yield of a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 228, 105631. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105631>
- Vizcayno-Soto, G., & Côté, B. (2004). Boundary-Line Approach to Determine Standards of Nutrition for Mature Trees From Spatial Variation of Growth and Foliar Nutrient Concentrations in Natural Environments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(19–20), 2965–2985. <https://doi.org/10.1081/CSS-200036517>
- Wagg, C., Bender, S. F., Widmer, F., & van der Heijden, M. G. A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14), 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Xu, N., Bhadha, J. H., Rabbany, A., & Swanson, S. (2019). Soil Health Assessment of Two Regenerative Farming Practices on Sandy Soils. *Sustainable Agriculture Research*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.5539/sar.v8n4p61>

ANEXO B

Figura A. Talhões de agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro e integrantes do Projeto Regenera Cerrado.

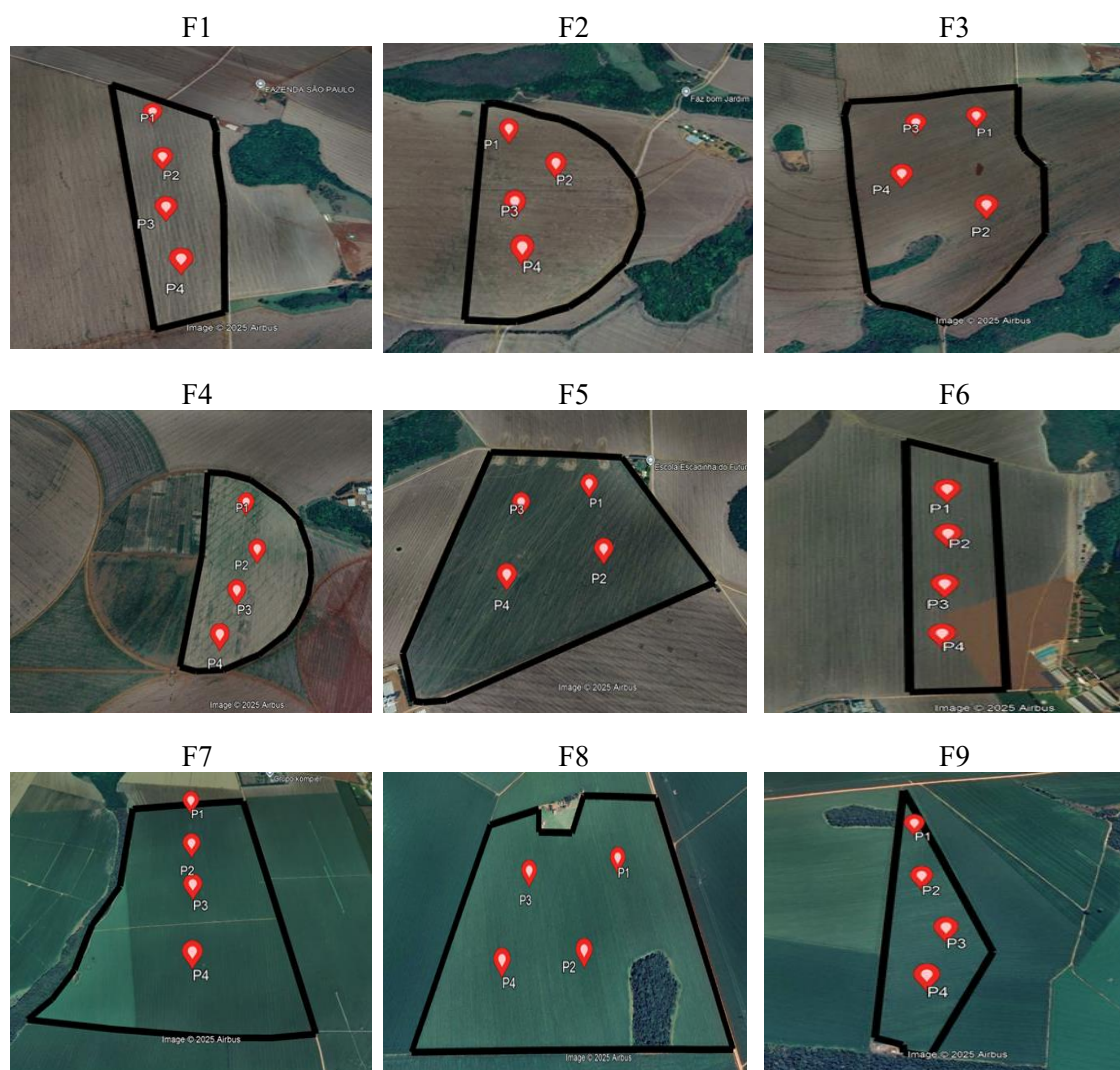


Figura B. Fotografias dos procedimentos de amostragens de solo.



Figura C. Resistência do solo à penetração (RP, MPa) em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.

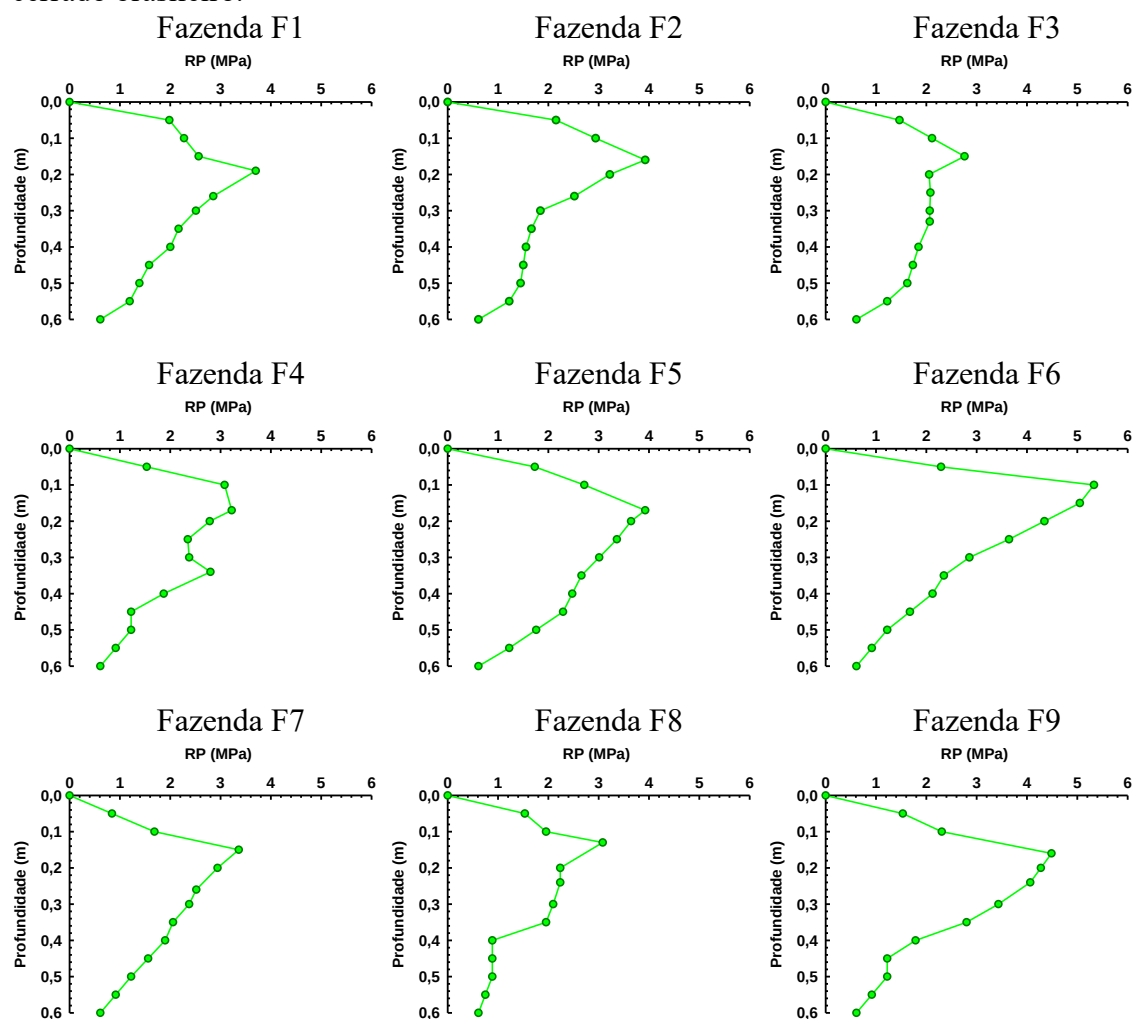
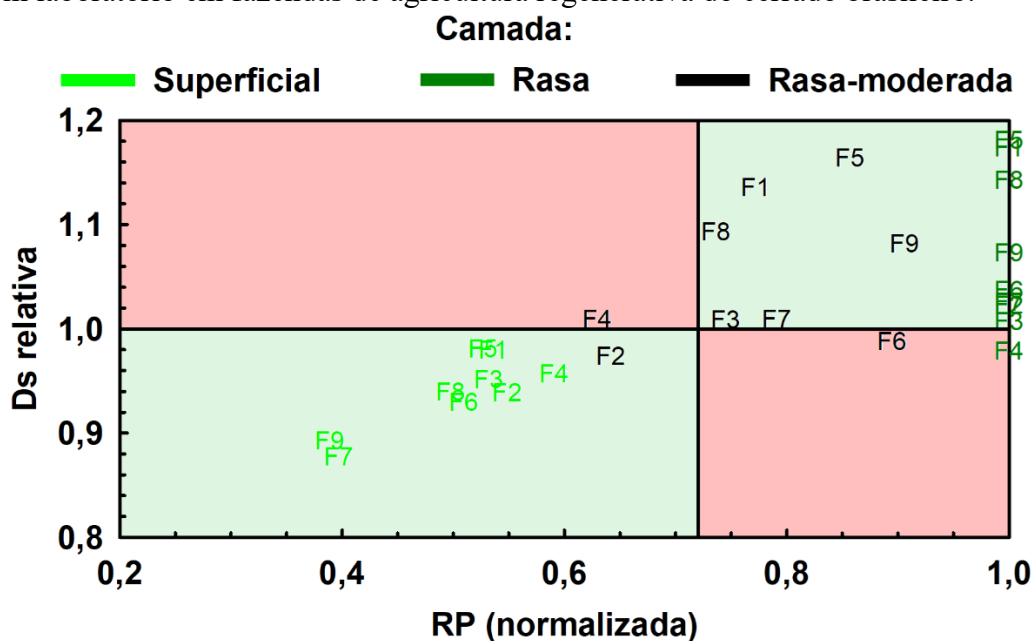


Figura D. Relação entre a diagnose da compactação do solo realiza em campo e em laboratório em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.



Uma proposição interpretativa para a diagnose da compactação do solo pela resistência à penetração medida à campo (RP normalizada) e por meio de amostras indeformadas analisadas em laboratório (Ds relativa) é apresentada. Na figura, as áreas hachuradas em verde representam consenso entre os dois procedimentos para a ausência ($Ds\ relativa < 1$) ou ocorrência ($Ds\ relativa > 1$) da compactação do solo. Nas áreas hachuradas em vermelho o critério se contrapõe e o diagnóstico de campo não se confirma em laboratório.

A partir da Ds relativa limítrofe, foi estabelecida em 0,72 de RP normalizada a maior convergência entre campo e laboratório (maior frequência de áreas analisadas dentro da hachura verde), cuja assertividade do critério proposto em nossos resultados foi de 89%. Somente uma fazenda (F4) na camada rasa (0,10-0,20 m) e duas (F4 e F6) na rasa-moderada (0,20-0,30 m) localizaram nos quadrantes contraditórios e, ainda assim, muito próximas as linhas limítrofes do acerto.

Planilha A. Descrição das práticas e índice de agricultura regenerativa em fazendas do cerrado brasileiro.

Princípio 1
“Perturbação mínima do solo”

Componente	Peso		FAZENDA								
	1										
Realizou revolvimento do Solo? (ex.: aração, gradagem aradora ou pesada, subsolagem etc.)	Frequência	Peso	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
	Revolveu há mais de 3 anos	1		X		X	X	X	X	X	X
	Revolveu há 3 anos	0,75			X						
	Revolveu há 2 anos	0,5	X								
	Revolveu há 1 ano	0,25									
	Revolveu há menos de 1 anos	0									
Utilizou mecanismos de abertura de sulco de semeadura?	Haste sulcadora anual	1						X	X	X	
	Uso ocasional da haste	0,5				X					
	Não faz uso de haste sulcadora (ex.: duplo disco)	0	X	X	X		X				X
Média =			0,25	0,5	0,4	0,75	0,5	1	1	1	0,5

Princípio 2
“Mantenha o solo coberto com vegetação ou material natural”

Componente vegetal	Frequência	Peso	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Faz consórcio?	Anual	1			X			X	X		
	Bianual	0,75					X				
	Triannual	0,5								X	
	Não faz	0	X	X		X					X
Palhada da cultura											
Manutenção da palhada da cultura sobre o solo (plantio direto)	Há mais de 15 anos	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	10 - 15 anos	0,75									
	5 - 10 anos	0,5									
	2 – 5 anos	0,25									
	Menos de 2 anos	0									
Média =			0,5	0,5	1	0,5	0,875	1	1	0,75	0,5

Princípio 3

“Aumentar a diversidade de plantas”

[illegible]

Princípio 4
"Mantenha raízes vivas no solo tanto quanto possível"

Consórcio de culturas	Frequência	Peso	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Qual a frequência do consórcio?	Anual	1			X			X	X		
	Bianual	0,75					X				
	Triannual	0,5								X	
	Não faz	0	X	X		X					X
Qual a diversidade de plantas no consórcio, no triênio?	≥ 4 plantas	1			X						
	3 plantas	0,75					X	X			
	2 plantas	0,5							X	X	
	1 plantas	0	X	X		X					X
Média =			0	0	1	0	0,75	0,875	0,75	0,5	0

Princípio 5
"Integrar os animais na fazenda tanto quanto possível"

Componente		
------------	--	--

Uso de resíduos orgânicos de origem animal? (Compostagem, composto orgânico animal, chorume, resíduo do biodigestor, esterco, outros)	Frequência	peso	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
	Anual	1				X		X	X		
	Bianual	0,5					X			X	X
	Triannual	0,25									
	Não faz	0	X	X	X						
Houve entrada de animais? (temporária)	Frequência	peso									
	Anual	1	X								
	Bianual	0,5									
	Triannual	0,25									
	Não faz	0		X	X	X	X	X	X	X	X
Média =			0,5	0	0	0,5	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25

ÍNDICE DE AGRICULTURA REGENERATIVA	FAZENDA								
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
	0,25	0,2	0,5	0,35	0,475	0,675	0,65	0,5	0,25

Planilha B. Julgamento da compactação do solo em fazendas de agricultura regenerativa do cerrado brasileiro.

Fazenda	Ponto/Repetição	Profundidade	Argila (g kg ⁻¹)	Dsreferência (Rezende et al., 2025)	Ds	Macroporosidade	Critério de julgamento da compactação do solo			Solo
							Ds	Atente a Macro?	Parecer	
F1	1	Superficial	684	1,23	1,19	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	632	1,28	1,29	0,12	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado

	3	Superficial	621	1,29	1,30	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Superficial	679	1,23	1,14	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	708	1,21	1,36	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	662	1,25	1,48	0,04	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa	666	1,25	1,51	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa	679	1,24	1,45	0,05	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	692	1,22	1,38	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa-moderada	674	1,24	1,39	0,09	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	672	1,24	1,31	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	729	1,19	1,48	0,02	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F2	1	Superficial	392	1,49	1,18	0,20	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	582	1,32	1,36	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Superficial	430	1,46	1,31	0,14	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Superficial	480	1,41	1,50	0,04	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa	385	1,50	1,53	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	577	1,33	1,39	0,05	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa	421	1,47	1,46	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Rasa	471	1,42	1,46	0,09	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	378	1,51	1,41	0,12	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Rasa-moderada	572	1,33	1,32	0,15	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Rasa-moderada	412	1,48	1,40	0,12	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Rasa-moderada	461	1,43	1,46	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F3	1	Superficial	616	1,29	1,38	0,08	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Superficial	584	1,32	1,10	0,16	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Superficial	567	1,34	1,33	0,12	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado

	4	Superficial	579	1,32	1,20	0,13	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	581	1,32	1,34	0,08	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	606	1,30	1,27	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Rasa	568	1,33	1,32	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Rasa	594	1,31	1,38	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	583	1,32	1,26	0,14	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Rasa-moderada	587	1,32	1,33	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	585	1,32	1,38	0,09	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	581	1,32	1,33	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F4	1	Superficial	675	1,24	1,19	0,14	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	518	1,38	1,23	0,13	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Superficial	540	1,36	1,43	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Superficial	622	1,29	1,18	0,14	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	684	1,23	1,29	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	523	1,38	1,17	0,16	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Rasa	550	1,35	1,22	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Rasa	627	1,28	1,39	0,04	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	693	1,22	1,26	0,16	Ds>Dsreferência	Não	Não atende	--
	2	Rasa-moderada	527	1,37	1,44	0,09	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	561	1,34	1,36	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	633	1,28	1,19	0,16	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
F5	1	Superficial	790	1,13	1,10	0,12	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	822	1,11	1,19	0,06	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Superficial	822	1,11	0,96	0,14	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Superficial	825	1,10	1,12	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado

	1	Rasa	826	1,10	1,28	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	831	1,10	1,28	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa	835	1,09	1,30	0,02	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa	831	1,10	1,33	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	843	1,09	1,24	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa-moderada	805	1,12	1,36	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	830	1,10	1,19	0,08	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	844	1,09	1,32	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F6	1	Superficial	677	1,24	1,20	0,13	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	677	1,24	1,16	0,15	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Superficial	663	1,25	1,10	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Superficial	691	1,22	1,14	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	712	1,21	1,29	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	721	1,20	1,30	0,06	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa	714	1,20	1,25	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa	708	1,21	1,15	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa-moderada	715	1,20	1,20	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Rasa-moderada	706	1,21	1,16	0,12	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Rasa-moderada	710	1,21	1,17	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Rasa-moderada	733	1,19	1,22	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F7	1	Superficial	665	1,25	1,16	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	712	1,21	1,01	0,19	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Superficial	722	1,20	1,22	0,08	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Superficial	694	1,22	0,89	0,25	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	754	1,17	1,03	0,14	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Rasa	727	1,19	1,23	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado

	3	Rasa	759	1,16	1,29	0,09	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa	769	1,15	1,25	0,08	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	700	1,22	1,03	0,19	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Rasa-moderada	752	1,17	1,22	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	761	1,16	1,25	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	777	1,15	1,21	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F8	1	Superficial	634	1,28	1,05	0,24	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	680	1,23	1,12	0,15	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Superficial	603	1,30	1,45	0,02	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Superficial	604	1,30	1,19	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	655	1,26	1,49	0,02	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	710	1,21	1,40	0,04	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa	672	1,24	1,42	0,03	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa	651	1,26	1,37	0,04	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	1	Rasa-moderada	673	1,24	1,41	0,09	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa-moderada	700	1,22	1,27	0,11	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	604	1,30	1,49	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	627	1,28	1,35	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
F9	1	Superficial	662	1,25	1,22	0,10	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	2	Superficial	659	1,25	1,15	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	3	Superficial	591	1,31	1,18	0,11	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	4	Superficial	379	1,50	1,19	0,20	Ds≤Dsreferência	Sim	Atende	Não compactado
	1	Rasa	672	1,24	1,43	0,06	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa	682	1,23	1,42	0,06	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa	581	1,32	1,36	0,10	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado

	4	Rasa	406	1,48	1,45	0,08	Ds>Dsreferência	Não	Não atende	--
	1	Rasa-moderada	684	1,23	1,36	0,08	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	2	Rasa-moderada	674	1,24	1,34	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	3	Rasa-moderada	575	1,33	1,38	0,07	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado
	4	Rasa-moderada	644	1,27	1,40	0,06	Ds>Dsreferência	Sim	Atende	Compactado

CONCLUSÃO GERAL

1. A distribuição granulométrica (teores de areia, silte e argila) é o principal regulador do comportamento físico-hídrico dos solos tropicais;
2. Em solos arenosos, a baixa disponibilidade de água é a limitação central;
3. Em solos argilosos, a alta suscetibilidade à compactação é o maior desafio, agravado por práticas agrícolas inadequadas;
4. A compactação é um processo inevitável em solos tropicais argilosos, mesmo com adoção de práticas como o tráfego com menor umidade;
5. A macroporosidade destaca-se como indicador-chave para o diagnóstico da compactação e da qualidade física do solo;
6. As funções de pedotransferência são ferramentas práticas, acessíveis e confiáveis para diagnóstico estrutural dos solos, com potencial de uso inclusive em condições de campo;
7. A quantificação precisa da argila total é essencial para o ajuste correto das funções de pedotransferência, especialmente porque a fração $< 0,05$ mm (pseudosilte) é apenas descritiva e não representa adequadamente o comportamento físico dos solos tropicais;
8. Apesar dos primeiros avanços das práticas regenerativas, os efeitos restauradores ainda são limitados, principalmente nas camadas superficiais mais compactadas;
9. A curta duração das práticas regenerativas e a falta de diversificação de culturas comprometeram os ganhos estruturais mais profundos;
10. Houve melhorias na estrutura superficial e aumento da condutividade hidráulica saturada, possivelmente devido ao incremento de matéria orgânica e maior atividade biológica;
11. A permeabilidade ao ar permaneceu satisfatória, mesmo em situações de degradação, evidenciando a resiliência física dos Latossolos do Cerrado;
12. A combinação de práticas regenerativas mais integradas, com diversificação de cultivos e uso de métodos diagnósticos eficazes como as funções de pedotransferência, é essencial para avançar na recuperação da qualidade física dos solos tropicais;
13. Essas ações são cruciais para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes, produtivos e ambientalmente sustentáveis nas regiões tropicais.
14. Contribuição dos atributos físicos na avaliação da compactação.