

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

A SAÚDE DO SOLO EM PEDOAMBIENTES DE PRODUÇÃO DE
SOJA E A SUA RELAÇÃO COM O SISTEMA DE MANEJO

Autora: Camila Moraes Fonseca
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano
Coorientadora: Prof.^a. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa

Rio Verde – GO
Dezembro de 2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE

PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

A SAÚDE DO SOLO EM PEDOAMBIENTES DE PRODUÇÃO DE
SOJA E A SUA RELAÇÃO COM O SISTEMA DE MANEJO

Autora: Camila Moraes Fonseca

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Coorientadora: Prof.^a. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde.

Rio Verde – GO

Dezembro de 2024

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

F676a Fonseca, Camila Moraes

A SAÚDE DO SOLO EM PEDOAMBIENTES DE
PRODUÇÃO DE SOJA E A SUA RELAÇÃO COM O SISTEMA
DE MANEJO / Camila Moraes Fonseca. Rio Verde 2025.

122f. il.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano.

Coorientadora: Prof^a. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa.

Tese (Doutor) - Instituto Federal Goiano, curso de 0232014 -
Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio Verde (Campus
Rio Verde).

1. índice de qualidade do solo. 2. perfil do solo. 3. 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

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:
Camila Moraes Fonseca

Matrícula:
2020102320140064

Título do trabalho:

A SAÚDE DO SOLO EM PEDOAMBIENTES DE PRODUÇÃO DE SOJA E A SUA RELAÇÃO COM O SISTEMA DE MANEJO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 12 /02 /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 incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

12 /02 /2025

Local

Data

Camila Moraes Fonseca

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Eduardo C. Seruiano

Assinatura do(a) orientador(a)



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

Ata nº 119/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA Nº/142

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE

Ao doze dia do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 08h, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: sob a presidência do primeiro, Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente); Prof.ª Dr.ª Katia Aparecida de Pinho Costa (Avaliadora interna); Prof. Dr. Bruno Montoani Silva (Avaliador externo); Prof. Dr. Edson Luiz Souchie (Avaliador interno); Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes (Avaliador externo) em sessão pública realizada no IF Goiano 3 Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de **CAMILA MORAES FONSECA**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias 3 Agronomia do Instituto Federal Goiano 3 Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (presidente), que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida a autora da Tese para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias 3 Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA**, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano 3 Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente)

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

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva (Avaliador externo)

Prof. Dr. Edson Luiz Souchie (Avaliador interno)

20Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes (Avaliador exte

Documento assinado eletronicamente por:

- Eduardo da Costa Severiano, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/12/2024 10:40:29.
- Edson Luiz Souchie, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/12/2024 17:35:47.
- Katia Aparecida de Pinho Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/12/2024 14:25:34.
- Bruno Montoani Silva, Bruno Montoani Silva - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Lavras (22078679000174), em 18/12/2024 16:52:43.
- Milton Ferreira de Moraes, Milton Ferreira de Moraes - Professor Avaliador de Banca - Ufmg (33004540000100), em 27/12/2024 09:50:19.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/12/2024. 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: 660890
Código de Autenticação: 3e339e92f3



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível. Por todo o cuidado comigo e com todos que direta e indiretamente foram responsáveis por este trabalho.

Para toda minha família, que nunca se opuseram ou colocaram dificuldades em meus sonhos, ensinando sempre o que significa amor, respeito, responsabilidade e fé. Eles são tudo na minha vida, meu esposo João Vitor, meus pais Delmiro e Leila, e a Raquel com a família.

Agradeço aos meus avós, que desde pequena incentivaram a estudar e a honrar meus pais. Meu avô José (*in memoriam*), avó Selma (*in memoriam*), avó Doralice e principalmente meu avô Manoel (*in memoriam*) que desde pequena me chamava de doutora e eu via a alegria sempre em seu olhar.

Ao meu orientador, professor Eduardo, que esteve presente em todos os momentos, como orientador e amigo nessa caminhada. E a sua esposa Kátia que caminhou conosco.

Aos amigos que fiz no laboratório de Física do Solo, Lorena, Alexandre, Ítalo e Wainer, que fizeram essa caminhada mais leve e divertida.

Aos funcionários do Instituto Federal Goiano, em especial aos motoristas que andaram por meses junto a nós.

Agradeço a todos os produtores, ao Gapes, as Universidades (UFLA e UFMT) e profissionais que contribuíram para a execução deste trabalho.

E, por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Muito Obrigada!

BIOGRAFIA DA AUTORA

Camila Moraes Fonseca, natural de Rio Verde – GO, nascida em 05 de janeiro de 1995, filha de Leila Maria Silva de Moraes Fonseca e Delmiro Lourenço Mendonça Fonseca.

Todo seu ensino foi realizado na cidade de Rio Verde – GO. Iniciou no Curso de Bacharelado em Agronomia na Universidade de Rio Verde (UniRV) em agosto de 2012, graduando-se em julho de 2016. No mesmo ano, em agosto de 2016, iniciou no mestrado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal na UniRV concluindo em agosto de 2018.

Em março de 2020, ingressou no Doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do IF Goiano - Campus Rio Verde, finalizando em dezembro de 2024.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRAT.....	xii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	3
CONCLUSÃO GERAL.....	122

CAPÍTULO 1

A saúde do solo em pedoambientes de alta performance da cultura da soja no Cerrado brasileiro

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1. Identificação da área de estudo e descrição das fazendas.....	13
2.2. Amostragem de solo e avaliações em campo.....	14
2.3. Determinações de laboratório.....	15
2.4. Desenvolvimento do índice de qualidade do solo.....	16
2.5. Análises estatística.....	18
3. RESULTADOS	19
4. DISCUSSÃO.....	25
4.1. Aspectos de avaliação do manejo do solo em perfil.....	25
4.2. Modelagem de P-IQS a partir dos IQ-atributos.....	33
4.3. Diagnose da saúde do solo em pedoambientes de alta performance para a cultura da soja.....	35
5. CONCLUSÃO.....	39
6. REFERÊNCIAS.....	40

CAPÍTULO 2

Diagnose da compactação do solo em pedoambientes agropecuário no Cerrado brasileiro

1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAL E MÉTODOS	64
2.1. Identificação da área de estudo e descrição das fazendas.....	64
2.2. Amostragem de solo e avaliações em campo.....	66
2.3. Determinações de laboratório.....	66
2.4. Análise estatística.....	68
3. RESULTADOS	68
4. DISCUSSÃO.....	79
4.1. Caracterização física de pedoambientes de produção em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....	79
4.2. Impacto do uso e sistemas de manejo na avaliação das alterações estruturais do solo....	81
4.3. Diagnose da compactação do solo.....	86
5. CONCLUSÃO.....	90
6. REFERÊNCIAS.....	91

ÍNDICE DE TABELA

Capítulo 1 - A saúde do solo em pedoambientes de alta performance da cultura da soja no Cerrado brasileiro

Tabela 1. Tipo de curva e pontuação utilizada para avaliar e transformar os indicadores de qualidade do solo em uma escala de zero a um.....17

Tabela 2. Momentos estatísticos das características físicas e dos atributos indicadores de qualidade do solo em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....19

Capítulo 2 - Diagnose da compactação do solo em pedoambientes agropecuário no Cerrado brasileiro

Tabela 1. Momentos estatísticos da altitude, das características físicas e dos atributos indicadores de qualidade estrutural do solo em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....72

Tabela 2. Efeitos diretos e indiretos, correlação e coeficiente de determinação (R^2) de diagrama causal da regressão múltipla de determinação da densidade do solo relativa em função dos atributos indicadores físicos em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....75

Tabela 3. Relações de regressão simplificadas entre propriedades do solo e densidade relativa (D_{srel}) estimada a partir do conteúdo de argila + silte do solo para todos os solos das fazendas de soja no Cerrado brasileiro.77

Tabela 4. Quantitativo de fazendas de soja no Cerrado brasileiro, classificadas de acordo com a Figura 7, usando os valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte.....79

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 - A saúde do solo em pedoambientes de alta performance da cultura da soja no Cerrado brasileiro

- Figura 1.** Mapa político do Brasil mostrando o Bioma Cerrado, o Estado de Goiás e o sudoeste goiano; e (c) pontos representando os locais de amostragem.....14
- Figura 2.** Curvas de pontuação para os indicadores de qualidade do solo, utilizadas nos atributos normalizados que quanto o maior valor é melhor, até o limite superior (se $x \leq 1$: $y = x$), para MOS, P, K, β -glicosidase e profundidade de Ca, RP e COT (a); “ponto ótimo” para o pH (b) e; “ponto ótimo” para a densidade relativa do solo (c).....16
- Figura 3.** Correlação de Pearson entre os atributos de qualidade do solo em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....20
- Figura 4.** Relações de regressão múltipla entre índices de qualidade dos atributos do solo (IQ-atributos) e o índice avaliação do manejo do solo em perfil (P-IQS) com os coeficientes de regressão, em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....21
- Figura 5.** Relação entre os valores observados do índice de avaliação do manejo do solo em perfil (P-IQS) e estimados a partir dos índices de qualidade dos atributos do solo (IQ-atributos), em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....21
- Figura 6.** Importância relativa dos indicadores de qualidade dos atributos do solo (IQ) na determinação do índice avaliação do manejo do solo em perfil (P-IQS), em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....22
- Figura 7.** Índices avaliação do manejo do solo em perfil (A, P-IQS) e de qualidades do solo, química (B, AE-Química), física (C, AE-Física), biológica (D, AE-Biologia) e de perfil (E, AE-Perfil) agrupados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....24

Capítulo 2 - Diagnose da compactação do solo em pedoambientes agropecuário no Cerrado brasileiro

- Figura 1.** Mapa político do Brasil mostrando o Bioma Cerrado, o Estado de Goiás e o sudoeste goiano; e (c) pontos representando os locais de amostragem.....65
- Figura 2.** Funções de pedotransferência para diagnose da compactação do solo, com destaque para a densidade do solo inicial (D_{si}) e limitante à macroporosidade do solo, em função do conteúdo de argila + silte de Latossolos da região do Cerrado Brasileiro.....71
- Figura 3.** Dispersão bidimensional dos escores da análise de componentes principais de 17 variáveis avaliadas em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....73
- Figura 4.** Contribuição das variáveis com o primeiro (A) e o segundo componente principal (B) avaliadas em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....75
- Figura 5.** Diagrama causal mostrando as correlações entre as variáveis independentes (linha tracejada) e as relações causa-efeito com a compactação do solo (linha cheia) estimada por meio da densidade relativa obtida por funções de pedotransferência a partir do conteúdo de argila (a) e argila + silte (b) em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....77
- Figura 6.** Acuracidade no julgamento da compactação do solo em função dos conteúdos de argila ou argila + silte, e da densidade do solo inicial (D_{si}) ou limitante (D_{sl}), pelo teste binomial de comparação das proporções em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....77
- Figura 7.** Distribuição dos valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte em fazendas de soja no Cerrado brasileiro. A área sombreada representa os seguintes critérios de julgamento: - abaixo do limite superior do intervalo de confiança de D_{si} (verde): solo perturbado; - entre o limite superior do intervalo de confiança de D_{si} e o inferior de D_{sl} (amarelo): sem compactação; - entre intervalo de confiança de D_{sl} (laranja): compactação limitante e; - acima do limite superior do intervalo de confiança de D_{sl} (vermelho): compactação severa.....78

ÍNDICE DE APÊNDICES

Capítulo 1 - A saúde do solo em pedoambientes de alta performance da cultura da soja no Cerrado brasileiro

Anexo A

Figura A. Fotografias dos procedimentos de amostragens.....	52
Tabela A. Locais de amostragem e breves descrições de lavouras do sudoeste do estado de Goiás, na safra 2021/2022.....	53
Figura A. Resistência do solo à penetração (RP, MPa) em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.....	55

Capítulo 2 - Diagnose da compactação do solo em pedoambientes agropecuário no Cerrado brasileiro

Anexo B

Figura A. Fotografias dos procedimentos de amostragens.....	104
Figura B. Funções de pedotransferência para estimativa da densidade do solo inicial (D_{si}), benéfica em termos de aumento da retenção de água no solo (D_{sb}), limitante devido à redução da macroporosidade em $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (D_{sl}) e crítica para o crescimento e rendimento das plantas com base no intervalo hídrico ótimo (D_{sc}), em função da argila total no solo extraída via dispersão ultrassônica (a) ou do conteúdo de argila + silte (b) em solos representativos do Cerrado brasileiro.....	105
Figura C. Correlações entre os atributos de qualidade física de 17 variáveis avaliadas em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....	106
Figura D. Relação entre argila total do solo e os conteúdos de argila + silte obtido via dispersão ultrassônica em solos representativos do Cerrado brasileiro.....	107
Figura E. Distribuição de todos os valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte em fazendas de soja no Cerrado brasileiro.....	107
Tabela A. Relação entre o conteúdo de argila total do solo e os conteúdos de argila mais silte, para fins de interpretação das classes texturais de fazendas de soja do Cerrado brasileiro.....	117
Tabela B. Atributos indicadores da qualidade física avaliados na pesquisa.....	118
Tabela C. Locais de amostragem e breves descrições de lavouras do sudoeste do estado de Goiás, na safra 2021/2022.....	120

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

(r) – análise de correlação de Pearson

AE – aspectos edáficos

APD – água prontamente disponível

Aw – Tropical Úmido

Ca – cálcio

Ca-Perfil – cálcio perfil

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

CaSO₄ – Sulfato de cálcio

CCr – capacidade de campo relativa

COT – carbono orgânico total

Dp – densidade de partículas

Ds – densidade do solo

Dsrel – densidade relativa

FPTs – funções de pedotransferência

g kg⁻¹ – gramas por quilograma

GAPES – Grupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano

GPS – Global Position System

IF Goiano – Instituto Federal Goiano

IQ-Ca perfil – índice de qualidade referente ao cálcio do perfil solo

IQ-Dsrel – índice de qualidade referente a densidade do solo

IQ-K – índice de qualidade referente ao potássio do solo

IQ-MOS – índice de qualidade referente a matéria orgânica do solo

IQ-MOS Perfil – índice de qualidade referente a matéria orgânica no perfil do solo

IQ-P – índice de qualidade referente ao fósforo do solo

IQ-pH – índice de qualidade referente ao pH do solo

IQ-RP Perfil – índice de qualidade referente a resistência penetração no perfil do solo

IQS – índice de qualidade do solo

IQ-atributos – índice de qualidade dos atributos do solo

IQ-β glico – índice de qualidade referente a enzima β-glicosidase do solo

ISE – índice de estabilidade estrutural do solo

K – potássio

K₀ – permeabilidade de água

K_{ear} – permeabilidade ao ar

Kg – kilograma

kPa – quilopascal

LBS – limite base superior

LI – limites inferior

LS – limite superior

m – metros

MacMic – relação entre macro e microporos

Mg ha⁻¹ – megagramas por hectare

MgCO₃ – Carbonato de magnésio

mm – milímetros

mm h⁻¹ – milímetros por hora

MOS – matéria orgânica do solo

MOS-Perfil – matéria orgânica no perfil do solo

MPa – mega Pascal

NaOH – hidróxido de Sódio

°C - celsius

P – fósforo

pH - potencial hidrogeniônico

P-IQS – índice de qualidade do solo em perfil

PT - porosidade total

RP – resistência a penetração

rpm – rotação por minuto

RP-Perfil – resistência a penetração no perfil do solo

UFPA – Universidade Federal de Lavras

UFMT – Universidade Federal do Mato Grosso

β glico – atividade da enzima β-glicosidase

RESUMO GERAL

A atividade agropecuária brasileira consolida a sua expansão no enfoque atual de verticalização dos processos produtivos e com as fazendas inseridas no Bioma Cerrado, adotando a maior quantidade de tecnologias de produção do mundo. Contraditoriamente, constata-se o desenvolvimento de sistemas agrícolas cada vez mais dependentes de insumos e, embora haja bases tecnológicas para o desenvolvimento de uma agricultura conservacionista, muitos fazendeiros ainda não as adotam o que compromete o desenvolvimento sustentável, até mesmo em pedoambientes de alta performance agrônômica. Este é o assunto discutido nesta tese, cujo objetivo foi avaliar a qualidade do solo em pedoambientes de produção de soja e a relação com o sistema de manejo, avaliando os indicadores de qualidade de solo em profundidade, em fazendas de soja, a fim de desenvolver uma ferramenta de avaliação integrada do manejo e aplicando-a na caracterização dos aspectos edáficos das áreas estudadas, e avaliar o impacto agrícola nos indicadores de qualidade física do solo em fazendas do Cerrado brasileiro com vistas à proposição de uma ferramenta de diagnose da compactação. No primeiro capítulo, testou-se a hipótese que a saúde do solo regula o funcionamento nos limites ecossistêmicos por meio de processos que são independentes, porém interligados pelo componente vegetal. Para tanto, foram coletadas amostras de solo em 40 lavouras de soja localizadas em fazendas da região do sudoeste do estado de Goiás, Brasil, cujos desempenhos agrônômicos superam as médias regional, nacional e dos principais países produtores de soja no mundo. Nestas, foram determinados os atributos químicos de capacidade de troca catiônica (CTC), pH, potássio (K), fósforo (P) e cálcio (Ca); físico de densidade do solo (D_s), densidade relativa (D_{srel}) e granulometria (textura) e; biológicos de atividade enzimática (β -glicosidase) e matéria orgânica do solo (MOS); estes foram classificados em aspectos edáficos químicos, físicos, biológicos e em perfil pela associação de atributos e camadas relacionadas à produção agrônômica. Pela proposição de escalas de pontuação para cada indicador, foi avaliado o impacto do manejo do solo em camadas distintas e integrados num índice de saúde do solo denominado de qualidade do solo em perfil (P-IQS). Nove indicadores avaliados estimaram este atributo e sendo estes representativos dos principais entraves do manejo do solo enfrentados pelos fazendeiros. Os resultados apontaram a alta variabilidade em todos os índices avaliados, dada a heterogeneidade natural dos solos em interação às práticas adotadas, sendo os problemas de ordem física associados à compactação do solo as maiores limitações agrônômicas e, por consequência, à degradação ambiental. Em relação à matéria orgânica do solo, o desafio está na necessária

estocagem ao longo do perfil visando ganhos agroambientais, enquanto os aspectos edáficos de ordem química expressaram as tecnologias disponíveis e os esforços dos fazendeiros na avaliação e correção da fertilidade do solo, com as maiores restrições associadas ao P que mais impactam o custo de produção dos cultivos. No segundo capítulo, foram adicionadas mais cinco fazendas com menor performance para então avaliar a eficácia de uma ferramenta de diagnose da compactação do solo. Os solos foram analisados para caracterização e para obtenção de 12 propriedades indicadoras de qualidade física, sendo está fortemente influenciada pela textura, sendo necessário isolar dos impactos do uso e manejo da composição do solo e foi possível pela determinação da densidade relativa e pela robustez da macroporosidade do solo. Assim, foi possível diagnosticar a ocorrência da compactação com 99% de acuracidade, atestada por um teste binomial de comparação das condições estruturais do solo, e com a ocorrência em todos os pedoambientes de produção, em todos os sistemas de manejo avaliados e majoritariamente em camadas imediatamente abaixo da superfície. Se os solos de textura arenosa e média isto não é um problema, nos argilosos e particularmente muito argilosos é praticamente inevitável e demanda esforços pelos fazendeiros para a sua mitigação.

Palavras-chave: índice de qualidade do solo; perfil do solo; solos tropicais.

GENERAL ABSTRACT

Brazilian agricultural activity is consolidating its expansion in the current verticalization focus of production processes and with farms located in the Cerrado Biome adopting the largest number of production technologies in the world. Paradoxically, the development of agricultural systems is increasingly dependent on inputs and, although there are technological bases for the development of conservationist agriculture, many farmers still do not adopt them, which compromises sustainable development even in pedoenvironments with high agronomic performance. This is the subject discussed in this thesis, whose objective was to evaluate soil quality in pedoenvironments for soybean production and the relationship with the management system, evaluating soil quality indicators in depth, on soybean farms, in order to develop an integrated management assessment tool and apply it to the soil characterization aspects of the studied areas, and to evaluate the agricultural impact on the soil physical quality indicators on farms in the Brazilian Cerrado with a view to proposing a tool for diagnosing compaction. In the first chapter, the hypothesis that soil health regulates its functioning within ecosystem limits was tested through processes that are independent but interconnected by the plant component. To this end, soil samples were collected from 40 soybean crops located on farms in the southwest region of the state of Goiás, Brazil, whose agronomic performances exceed the regional, national and major soybean-producing countries' averages worldwide. In these, the chemical attributes of cation exchange capacity (CEC), pH, potassium (K), phosphorus (P) and calcium (Ca) were determined; physical attributes of soil density (Ds), relative density (Dsrel) and granulometry (texture); and biological attributes of enzymatic activity (β -glucosidase) and soil organic matter (SOM); these were classified into chemical, physical, biological and profile edaphic aspects by the association of attributes and layers related to agronomic production. By proposing scoring scales for each indicator, the impact of soil management was assessed in distinct layers and integrated into a soil health index called the profile Soil Quality Index (P-SQI). Nine indicators evaluated estimated this attribute and were representative of the main soil management obstacles faced by farmers. Our results indicated high variability in all indexes evaluated due to the natural heterogeneity of soils in interaction with the practices adopted, with physical problems associated with soil compaction being the greatest agronomic limitations and, consequently, environmental degradation. Regarding soil organic matter, the challenge lies in the necessary storage throughout the profile aiming at agro-environmental gains, while chemical edaphic aspects expressed the available technologies and farmers' efforts in assessing and correcting soil fertility, with the greatest restrictions associated with P, which most impacts crop production costs. In the second chapter, five more farms with lower performance were added to evaluate the effectiveness of a soil compaction diagnostic tool. The soils were analyzed for characterization and to obtain 12 properties indicating physical quality, which is strongly influenced by texture, and it was necessary to isolate the impacts of soil use and management on soil composition, which was possible by determining the relative density and robustness of soil macroporosity. Thus, it was possible to diagnose the compaction occurrence with 99% accuracy, attested by a binomial test comparing soil structural conditions, and with its occurrence in all production pedoenvironments, in all management systems evaluated and mainly in layers immediately below the surface. While this is not a problem in sandy and medium-textured soils, it is practically inevitable in clayey and particularly very clayey soils and requires efforts by farmers to mitigate it.

Keywords: soil quality index; soil profile; tropical soils

Introdução geral

O agronegócio no Brasil é destaque no cenário mundial, cujos índices de produtividade obtidos para as diversas culturas podem ser considerados as maiores conquistas da ciência agropecuária mundial no século XX (Lopes e Guimarães Guilherme, 2016). Títulos de “fazenda global” (Tollefson, 2010) ou campanhas como “salve a Amazônia” (Tollefson, 2013) estão associados aos recordes consecutivos de produtividade e ao ônus da preservação da biodiversidade que caminha, supostamente, na contramão do desenvolvimento agropecuário. Ao passo que se reconhece o papel da agricultura brasileira na segurança alimentar global (Pereira *et al.*, 2012; Gil *et al.*, 2018), entidades internacionais também alertam sobre a ameaça aos recursos naturais, bem como à preservação etnocultural nativa (Sullivan, 2013; Gibbs *et al.*, 2015; Strassburg *et al.*, 2017).

A região do Cerrado, polo agrícola do Brasil (Rada, 2013), é predominantemente recoberta por Latossolos [segundo a classificação brasileira - Santos *et al.* (2018); 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)]. São solos quimicamente pobres sob condições naturais, de modo que a inserção no processo produtivo demandou técnicas de correção químicas e biológicas que hoje são de domínio público. O negligenciamento da importância das condições físicas comumente favoráveis (por exemplo: elevada profundidade efetiva, ausência de pedregosidade e elevada friabilidade), a adoção de tecnologias de mecanização em todas as etapas do processo produtivo têm promovido a degradação da estrutura (Severiano *et al.*, 2013). Se por um lado, a expansão agrícola na região ocorre fundamentalmente em áreas anteriormente cultivadas com pastagens degradadas (Soares *et al.*, 2019), a busca por alternativas sustentáveis e eficientes que minimizem os impactos ambientais gerados pelo cultivo torna-se a base para evitar a necessidade de abertura de áreas nativas para avanço da fronteira agrícola e, considerando a realidade do desmatamento ilegal (Rajão *et al.*, 2020; Caires *et al.*, 2022), levando a perdas da biodiversidade do ecossistema (Lemaire *et al.*, 2014; 2015).

A maior capacidade operacional das máquinas para atender o estreito calendário agrícola têm sido a principal tecnologia adotada. Este cenário reflete as demandas do principal modelo agrícola instalado no Brasil, baseado na produção de grãos em duas safras consecutivas de *commodities*, notadamente soja e milho em sucessão (Fischer, 2009; Ferreira *et al.*, 2020). Por outro lado, a diversificação dos cultivos e a adoção de sistemas de manejo conservacionistas

têm sido sugeridas como estratégias de sustentabilidade agroambiental e também adotadas na mitigação do aquecimento global (Brazil's iNDC, 2015). A rotação de culturas, notadamente na segunda safra, com o uso de plantas de cobertura e, ou a integração agricultura-pecuária enquadram-se nessas premissas (Lemaire *et al.*, 2014; Salton *et al.*, 2014; Dias *et al.*, 2020; Bonetti *et al.*, 2023).

Contraditoriamente, constata-se o desenvolvimento de sistemas agrícolas cada vez mais dependentes de insumos e a reconversão de áreas sob plantio direto ao cultivo convencional, com operações de preparo do solo sendo realizadas com frequência (Peixoto *et al.*, 2020). Nos campos de produção observa-se a estagnação ou mesmo a queda no rendimento dos cultivos, além da ocorrência de processos de degradação dos recursos naturais, como a compactação e erosão, assoreamento e eutrofização de mananciais de superfície decorrentes do arraste de partículas de solo e de fertilizantes aos cursos hídricos. Embora existam bases tecnológicas para o desenvolvimento da agricultura conservacionista, muitos agricultores ainda não as adotam (Tollefson, 2010).

A contribuição da pesquisa agropecuária brasileira para este sucesso do campo é reconhecida internacionalmente. Por meio de estudos realizados em solos sob Cerrado, foi possível identificar as principais limitações químicas (Lopes, 1984) e definir limites críticos para recomendação de corretivos e fertilizantes (Souza e Lobato, 2004; Lopes e Guimarães Guilherme, 2016), conhecer aspectos de manejo associados à qualidade física (Kielh, 1979; Camargo e Alleoni, 1997; Oliveira *et al.*, 2004; Severiano *et al.*, 2011), bem como à degradação (Oliveira *et al.*, 2007) e, mais recentemente, aos atributos biológicos associados as altas produtividade agrícolas (Mendes *et al.*, 2019). Entretanto, a contribuição destes aspectos edáficos em pedoambientes de produção manejados sob a ótica conservacionista ainda carece de validação científica para serem recomendadas como ferramenta de identificação da saúde do solo e, desta forma, subsidiar tomadas de decisão quanto as práticas de manejo a serem adotadas.

Referências

BRAZIL - **Intended Nationally Determined Contribution**. New York: UNFCCC, September 27, 2015.

<<http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>>

BONETTI, J. de A.; NUNES, M. R.; FINK, J. R.; TRETTO, T.; TORMENA, C. A. Agricultural practices to improve near-surface soil health and crop yield in subtropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 234, n. December 2022, p. 1–10, 2023.

CAIRES, E. F.; DUART, V. M.; RODRIGUES, G. L. A.; BINI, A. R. Crop nutrition and grain yield as affected by phosphorus fertilization and continued use of phosphogypsum in an Oxisol under no-till management. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, p. 2370–2385, 2022.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

DIAS, M.B.de C.; COSTA, K.A.P.; SEVERIANO, E.C.; BILEGO, U.O.; ALMEIDA, D.P.; BRAND, S.C.; VILELA, L. Brachiaria and Panicum maximum in an integrated crop-livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. **Journal of Agricultural Science**, v. 2, p. 1-12, 2020

FERREIRA, C.J.B.; TORMENA, C.A.; SEVERIANO, E.C.; ZOTARELLI, L.; BETIOLI JUNIOR, E. Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 1, p. 1, 2020.

FISCHER, T. Brazilian Cerrado: current status and prospects as a food bowl for the world. **Agricultural Science**, v. 21, p. 32-36, 2009.

GIBBS, H.K.; RAUSCH, L.; MUNGER, J.; SCHELLY, I.; MORTON, D.C.; NOOJIPADY, P.; SOARES-FILHO, B.; BARRETO, P.; MICOL, L.; WALKER, N.F. Brazil's soy moratorium: supply-chain governance is needed to avoid deforestation. **Science**, v. 347, p. 377-378, 2015.

GIL, J.D.B.; GARRETT, R.D.; ROTZ, A.; DAIIOGLOU, V.; VALENTIM, J.; PIRES, G.F.; COSTA, M.H.; LOPES, L.; REIS, J.C. Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso. Brazil. **Environmental Research Letters**, 13, e064025, 2018.

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

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P.C.F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014.

LEMAIRE, G.; GASTAL, F.; FRANZLUEBBERS, A. CHABBI, A. Grassland-Cropping Rotations: An avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. **Environmental Management**, v. 56, p. 1065-1077, 2015.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo**. (2ª ed). Piracicaba: Potafos, 1984.162p.

MENDES, I.C; SOUSA, D.M.G.; REIS JUNIOR, F.B.; LOPES, A.A.C.; SOUZA, L.M. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. In: SEVERIANO, E.C.; MORAES, M.F.; PAULA, A.M. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo - Volume X**. 1ed.Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019, p. 399-462.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; RESCK, D.V.S. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 265-270, 2007.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; DE OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; DA SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104307, 2019a.

PEREIRA, P.A.A.; MARTHA JÚNIOR, G.B.; SANTANA, C.A.M.; ALVES, E. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture & Food Security**, v. 1, p. 1-12, 2012.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v. 38, p. 146-155, 2013.

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. The rotten apples of Brazil's agribusiness. **Science**, v. 369, p. 246-248, 2020.

SALTON, J.C.; MERCANTE, F.M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J.A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W.M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

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

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 773-782, 2011.

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

SOARES, D.S.; RAMOS, M.L.G.; MARCHÃO, R.L.; MACIEL, G.A.; OLIVEIRA, A.D.; MALAQUIAS, J.V.; CARVALHO, A.M. How diversity of crop residues in long-term no tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104316, 2019.

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

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

STRASSBURG, B.B.N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; OLIVEIRA FILHO, F.J.B.; SCARAMUZZA, C.A.M.; SCARANO, F.R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature, Ecology e Evolution**, v. 1, p. 0099, 2017.

SULLIVAN, L. Identity, territory and land conflict in Brazil. **Development and Change**, v. 44, p. 451-471, 2013.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature**, v. 466, p. 554-556, 2010.

TOLLEFSON, J. A light in the forest: Brazil's fight to save the Amazon and climate change diplomacy. **Foreign Affairs**, v. 92, p. 141-151, 2013.

OBJETIVOS

Geral:

Avaliar a qualidade do solo em pedoambientes de produção de soja e a relação com o sistema de manejo.

Específicos:

- Avaliar os indicadores de qualidade de solo em profundidade, em fazendas de soja, a fim de desenvolver uma ferramenta de avaliação integrada do manejo, aplicando-a na caracterização dos aspectos edáficos das áreas estudadas.
- Avaliar o impacto agrícola nos indicadores de qualidade física do solo em fazendas do Cerrado brasileiro com vistas à proposição de uma ferramenta de diagnose da compactação.

CAPÍTULO 1

A SAÚDE DO SOLO EM PEDOAMBIENTES DE ALTA PERFORMANCE DA CULTURA DA SOJA NO CERRADO BRASILEIRO

RESUMO: A atividade agropecuária brasileira consolida a sua expansão no enfoque atual de verticalização dos processos produtivos nas fazendas tropicais cujos solos são muito intemperizados, e com intensa adoção de tecnologias de produção. Contraditoriamente, constata-se o desenvolvimento de sistemas agrícolas cada vez mais dependentes de insumos e, embora haja bases tecnológicas para o desenvolvimento de uma agricultura conservacionista, muitos fazendeiros ainda não as adotam comprometendo o desenvolvimento sustentável até mesmo em pedoambientes de alta performance agronômica. Este trabalho testou a hipótese que a saúde do solo regula o funcionamento nos limites ecossistêmicos por meio de processos que são independentes, porém interligados pelo componente vegetal. O objetivo foi avaliar os indicadores de qualidade de solo em profundidade, em fazendas de soja, a fim de desenvolver uma ferramenta de avaliação integrada do manejo e aplicando-a na caracterização dos aspectos edáficos das áreas estudadas. Para tanto, foram coletadas amostras de solo em 40 lavouras de soja localizadas em fazendas da região sudoeste do estado de Goiás, Brasil, cujos desempenhos agronômicos superam as médias regional, nacional e dos principais países produtores de soja no mundo. Nestas, foram determinados os atributos químicos de capacidade de troca catiônica (CTC), pH, potássio (K), fósforo (P) e cálcio (Ca); físicos de densidade do solo (Ds), densidade relativa (Dsrel) e granulometria (textura) e; biológicos de atividade enzimática (β -glicosidase) e matéria orgânica do solo (MOS); estes foram classificados em aspectos edáficos químicos, físicos, biológicos e em perfil. Pela proposição de escalas de pontuação para cada indicador, foi avaliado o impacto do manejo do solo em camadas distintas e integrados em um indicador da saúde do solo denominado de Índice de Qualidade do Solo em Perfil (P-IQS). Nove indicadores avaliados o estimou e sendo estes representativos dos principais entraves do manejo do solo enfrentados pelos fazendeiros. Os resultados apontaram alta variabilidade em todos os índices avaliados, dada a heterogeneidade natural dos solos em interação às práticas adotadas, sendo os problemas de ordem física associados à compactação do solo as maiores limitações agronômicas e, por conseguinte, ambientais. Em relação à matéria orgânica do solo, o desafio está na necessária estocagem ao longo do perfil visando ganhos agroambientais, enquanto os

aspectos edáficos de ordem química expressaram as tecnologias disponíveis e os esforços dos fazendeiros na avaliação e correção da fertilidade do solo cujas maiores restrições associadas a elementos que mais impactam o custo de produção dos cultivos.

Palavras-chave: *Glycine max*; Perfil do solo; Compactação do solo; Qualidade do solo

SOIL HEALTH IN HIGH-PERFORMANCE SOYBEAN CROP PEDOENVIRONMENTS IN THE BRAZILIAN CERRADO

ABSTRACT: Brazilian agricultural activity is consolidating its expansion in the current verticalization focus of production processes, with farms located in the Cerrado Biome adopting the largest number of production technologies in the world. Paradoxically, the development of agricultural systems increasingly dependent on inputs has been observed, and although there are technological bases for the development of conservationist agriculture, many farmers still do not adopt them, which compromises sustainable development even in pedoenvironments with high agronomic performance. This study tested the hypothesis that soil health regulates its functioning within ecosystem limits through processes that are independent but interconnected by the plant component. The objective was to evaluate soil quality indicators in depth on soybean farms to develop an integrated management assessment tool and apply it to the characterization of soil aspects of the studied areas. To this end, the study was carried out on soil samples collected from 40 soybean crops located on farms in the southwest region of the state of Goiás, Brazil, whose agronomic performances exceed the regional, national and major soybean-producing countries' averages worldwide. In these, the following chemical attributes were determined: cation exchange capacity (CEC), pH, potassium (K), phosphorus (P) and calcium (Ca); physical attributes: soil density (Ds), relative density (Dsrel) and granulometry (texture); and biological attributes: enzymatic activity (β -glucosidase) and soil organic matter (SOM); these were classified into chemical, physical, biological and profile edaphic aspects. By proposing scoring scales for each indicator, the impact of soil management in different layers was assessed and integrated into a soil health index called the Profile Soil Quality Index (P-SQI). Nine indicators evaluated estimated this attribute and were representative of the main obstacles faced by farmers in soil management. The results showed high variability in all indexes evaluated due to the natural heterogeneity of soils in interaction with the practices adopted, with physical problems associated with soil compaction being the greatest agronomic and, consequently, environmental limitations. Regarding soil organic matter, the challenge lies in the necessary storage throughout the profile aiming at agro-environmental gains, while chemical edaphic aspects expressed the available technologies and farmers' efforts in assessing and correcting soil fertility, whose greatest restrictions are associated with elements that most impact crop production costs.

Keywords: Glycine max; Soil profile; Soil compaction; Soil quality index.

1. Introdução

O protagonismo do Brasil na segurança alimentar global é reconhecido no mundo, graças às avançadas tecnologias de produção agropecuária, especificamente desenvolvidas para os trópicos. Esta revolução levou o país, nos últimos 30 anos do século XX, de importador à proeminente exportador de diversos produtos em 4F's (food, feed, fiber and fuel), sem negligenciar a conservação da biodiversidade e dos recursos naturais (Silva *et al.*, 2020). Estimativas futuras projetam a agricultura brasileira atendendo 40% da demanda por alimentos até 2050 quando a população mundial ultrapassará 9,7 bilhões de pessoas (Lopes e Guilherme, 2016).

Parte deste êxito foi alcançada pela conversão de áreas já abertas, antes destinadas à pastagens e que na maioria das vezes degradadas, em campos de produção (Camargo *et al.*, 2017, Piras *et al.*, 2021). Destacando a agricultura de sequeiro e o cultivo da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] como um dos focos da expansão agrícola, o que se deve principalmente ao recobrimento majoritário por solos muito intemperizados e inseridos em topografia suavizada, potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada (Severiano *et al.*, 2013; Winkler *et al.*, 2021).

Esses solos tropicais são muito responsivos às correções químicas e biológicas, mas, em contrapartida, extremamente suscetíveis à compactação pelo intenso tráfego de maquinários e o pisoteio animal (Silva *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2023; Nascimento Júnior *et al.*, 2023). Nas lavouras brasileiras, comumente também são detectados problemas de manejo relacionados à elevada toxidez por alumínio em profundidade e aos baixos conteúdos de matéria orgânica e de nutrientes (Sousa & Lobato, 2004; Costa e Crusciol, 2016), ao baixo metabolismo microbiano ou ainda à degradação física (Silva *et al.*, 2021; Bansal *et al.*, 2022). Superar estes desafios com práticas voltadas à eficiência produtiva dos sistemas agrícolas em convergência à manutenção dos recursos naturais e à mitigação do desmatamento ilegal têm sido a tônica de discussões e o enfoque dos estudos de qualidade do solo como promotora da saúde (Tollefson, 2010; Rajão *et al.*, 2020; Serafim *et al.*, 2023).

A qualidade do solo/saúde do solo é definida como a capacidade de um solo em funcionar nos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal, atual e futura (Soil Science Society of American, SSSA, 2025). Uma forma eficiente de avaliá-la é através de índices integrados por atributos relacionados ao manejo adotado. Neste sentido, a proposição de Doran e Parkin

(1994) em considerar valores de referência (mínimos e máximos) das principais propriedades do solo tem sido amplamente adotada no mundo (Bunemann *et al.*, 2018; Simon *et al.*, 2022; Bonetti *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2024) e com êxito em pedoambientes tropicais, geralmente porém em estudos de camadas superficiais de solo (Cherubin *et al.*, 2016; Luz *et al.*, 2019; Ruiz, *et al.*, 2020; Marion *et al.*, 2022). Nesta ferramenta, os atributos são convertidos a escores (variando de 0 a 1) que refletem a funcionalidade dos aspectos químicos, físicos e biológicos, em que a pontuação 0 indica a ausência e 1 a máxima capacidade funcional e produtiva do solo avaliado.

Para refinamento da diagnose, a compreensão sistêmica em solo-planta deve ser confrontada com os demais componentes da produção, como no caso de pesquisas desenvolvidas em fazendas comerciais e, em particular, aquelas sob alta performance agrônômica (Serafim *et al.*, 2019). Este avanço constitui não somente economia de tempo e de recursos, mas define relações entre as propriedades do solo, o rendimento dos cultivos e os aspectos agroambientais (Cook e Trlica, 2016; Huang *et al.*, 2022; Jacobs *et al.*, 2022), bem como estratégias de mitigação de desordens climáticas causadas por irregularidades pluviométricas (Cruz *et al.*, 2011; Torino *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021). Apesar das grandes contribuições prestadas à compreensão dos processos edáficos de superfície, os atuais estudos ao avaliarem camadas rasas assumem conotação de reduzido volume explorado pelo sistema radicular, aumentando a suscetibilidade dos cultivos ao déficit hídrico e a lixiviação de nutrientes para fora da zona radicular (Caires *et al.*, 2022). Assim, e em solos saudáveis, o termo perfil refere-se não apenas a uma seção vertical que atravessa todos os seus horizontes estendendo-se até o horizonte C (SSSA, 2025), mas como aquele que possibilita a expressão fenotípica das plantas cultivadas e aliada à manutenção das funções edáficas (Severiano *et al.*, 2011; Ferreira *et al.*, 2023).

A hipótese deste trabalho é que sob cultivo de soja em pedoambientes de alta performance e em áreas heterogêneas, a saúde do solo regula o funcionamento nos limites ecossistêmicos por meio de processos que são independentes, porém interligados pelo componente vegetal. Esta pesquisa objetivou: I - avaliar os indicadores de qualidade de solo em profundidade em fazendas de soja de alta performance; II - desenvolver uma ferramenta de avaliação do manejo do solo em perfil e; III - caracterizar a saúde do solo em pedoambientes de alta performance da cultura da soja na região do Cerrado brasileiro.

2. Material e Métodos

2.1. Identificação da área de estudo e descrição das fazendas

O estudo foi realizado em amostras de solo coletadas em lavouras de soja localizadas na região do sudoeste do estado de Goiás, Brasil, abrangendo 40 fazendas nos municípios de São João da Paraúna, Paraúna, Caiapônia, Indiará, Acreúna, Montividiu, Joviânia, Mineiros, Pontalina, Rio Verde e Jataí (Figura 1). É uma das regiões com maior emprego de tecnologias agropecuárias do mundo, cujos campos de produção estão inseridos em relevos pouco movimentados e nos solos mais velhos do mundo [datados do Cretáceo e do Terciário e cuja mineralogia expressa o avançado intemperismo, segundo Marques *et al.* (2004)], com grande destaque para os Latossolos e Neossolos Quartzarênicos (Santos *et al.*, 2018) [ou Oxisols e Typic Quartzipsamments na Keys to Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022)], ajudando a explicar o avanço da agricultura mecanizada e intensiva (Severiano *et al.*, 2013).

O clima é classificado de acordo com Köppen (Alvares *et al.*, 2013) como Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual da região é de 25°C e a média pluviométrica anual é de aproximadamente 1600 mm, com a máxima precipitação em janeiro e menores em junho, julho e agosto (< 50 mm mês⁻¹). O fenômeno climático “veranico” ocorre em plena estação chuvosa, normalmente com duração de 10 a 15 dias sem a ocorrência de precipitações, podendo, eventualmente, prolongar por mais de 60 dias (Torino *et al.*, 2020).

As fazendas estudadas apresentaram produtividade média de soja em até seis safras (2017 a 2022) acima de 3,75 Mg ha⁻¹, que foi transformada na unidade comercial padrão no Brasil, sacas (60 kg) ou na unidade do mercado internacional, bushel (27,22 kg), e corrigida para umidade de 14%, para obter produtividade correspondente acima de 62 sacas ou 137 bushels. A descrição, bem como os aspectos de manejo do solo em todas as fazendas estão apresentadas no anexo (Anexo 1).

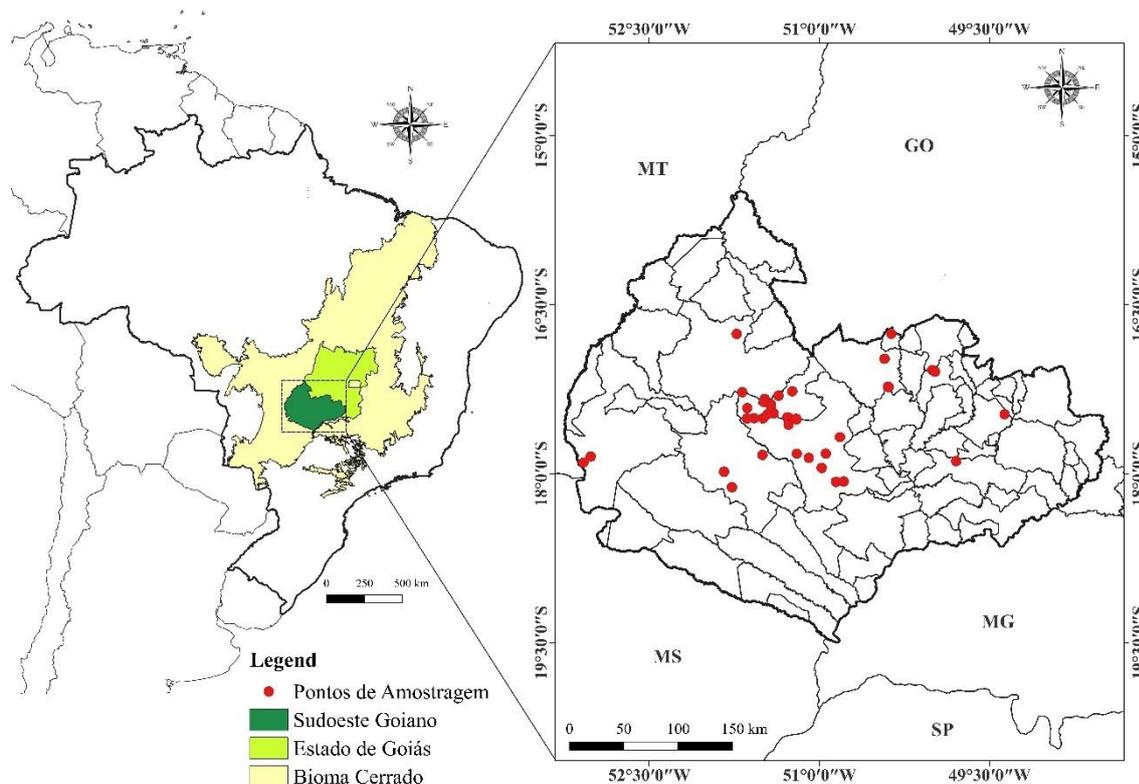


Figura 1. Mapa político do Brasil mostrando o Bioma Cerrado, o Estado de Goiás e o sudoeste Goiano; e (c) os pontos representando os locais de amostragem.

2.2. Amostragem de solo e avaliações em campo

A amostragem foi realizada após a colheita da soja referente à safra verão 2022. Foram definidos por meio de um transecto na posição central do talhão e localizados em campo com aparelho receptor de GPS (Global Position System), cinco pontos a 50m equidistantes no sentido da declividade do terreno, visando abranger a variabilidade dos atributos na topossequência e sendo as respectivas repetições experimentais em cada área.

Em cada ponto, foi realizado em campo o teste de penetrometria até 0,60 m de profundidade para obtenção da máxima resistência do solo à penetração (RP), utilizando um equipamento de impacto (Stolf *et al.*, 1983), e coletadas amostras de solos com as seguintes características:

- Uma amostra deformada de solo, com aproximadamente 1 kg na camada de 0-0,10 m, que foi aclimatada em campo com o auxílio de caixas de isopor e gelo seco e, posteriormente, refrigeradas a 4°C em câmara fria, totalizando 200 amostras (40 lavouras x 5 repetições) para as análises enzimáticas (atividade biológica) do solo;

- Uma amostra deformada de solo por camada, com aproximadamente 1 kg, a 0-0,10, 0,10-0,20, 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, totalizando 1000 amostras (40 lavouras x 5 camadas x 5 repetições) para as análises químicas e matéria orgânica do solo, e;
- Uma amostra indeformada de solo em anéis volumétricos de 0,054 m de diâmetro e 0,06 m de altura, à camada de maior impedimento mecânico obtida via penetrometria entre 0,10-0,30m e estando a profundidade de máxima resistência ao centro do anel (conforme apresentada no Anexo A), totalizando 200 amostras (40 lavouras x 5 repetições) para as análises físicas do solo.

2.3. Determinações de laboratório

As amostras foram encaminhadas aos seguintes laboratórios: Laboratório de Física do Solo e Laboratório de Microbiologia Agrícola do Instituto Federal Goiano (IF Goiano), Laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Centro de Pesquisa Multiusuário do Araguaia, da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Os atributos avaliados foram definidos pela literatura e pela opinião de experts, conforme proposto por Marion *et al.* (2022) e seguindo as indicações de Bunemann *et al.* (2018) e Simon *et al.* (2022).

Para as análises microbiológicas do solo, após a obtenção da TFSA, foi analisada a atividade da enzima β -glicosidase (Tabatabai, 1994) e o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), também nas camadas subsuperficiais, via oxidação com o dicromato de potássio (Teixeira *et al.*, 2017).

As amostras indeformadas foram processadas em laboratório e submetidas à estufa a 105°C por 48 horas para determinação da densidade do solo (Ds) através da relação entre a massa seca e o respectivo volume (Blake & Hartge, 1986). As sobras do anel foram secadas ao ar e passadas por peneiras de dois milímetros para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), e submetidas a análise textural via agitação lenta (50 rpm) por 16 horas com a adição de 30 g de areia muito grossa (1,00-2,00 mm) como dispersantes físicos e NaOH 1N como dispersante químico. As partículas de areia (diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm) foram quantificadas por tamisagem e as de silte (0,05 - 0,002 mm) e argila (<0,002 mm) por sedimentação diferencial pelo método da pipeta, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

De posse dos resultados, obteve-se a densidade relativa (Ds rel) da camada mais compactada (camada de maior densidade do solo) utilizando a função de pedotransferência de Severiano *et al.* (2011) para a condição benéfica ao desempenho das funções ecológicas do solo.

As demais determinações químicas do solo também foram realizadas conforme Teixeira *et al.* (2017) para os seguintes atributos: potássio disponível (K, 0-0,20 m), fósforo disponível (P, 0-0,10 e 0,10-0,20 m), cálcio disponível (Ca, 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) - via solução de Mehlich e ICP (espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado) e; pH em CaCl₂ (0,0,20 m). Também foi calculada a (T, total a pH 7, 0-0,20 m).

Adicionalmente, determinou-se as profundidades em que os conteúdos de Ca e MOS foram restritivos, sendo denominados de Ca-Perfil e MOS-Perfil, ao passo que a profundidade de maior resistência à penetração foi considerada como RP-Perfil.

2.4. Desenvolvimento do índice de qualidade do solo

O índice de qualidade dos atributos do solo (IQ-atributos) foi desenvolvido seguindo os procedimentos descritos por Larson e Pierce (1994) para obtenção de resultados capazes de refletir os aspectos do manejo adotado nas fazendas. As curvas de pontuação foram obtidas a partir da transformação dos resultados em escores variando de 0 a 1, pelo ajuste das funções descritas na Figura 2 e após a normalização dos valores obtidos pelo limite superior (LS) dos indicadores de qualidade do solo (Tabela 1), dos atributos com maior valor (modelo linear com platô em que “+ é 1”) ou dos valores absolutos daqueles com valor ótimo (“ótimo é 1”), sendo 0 a pior qualidade e 1 a melhor qualidade do solo.

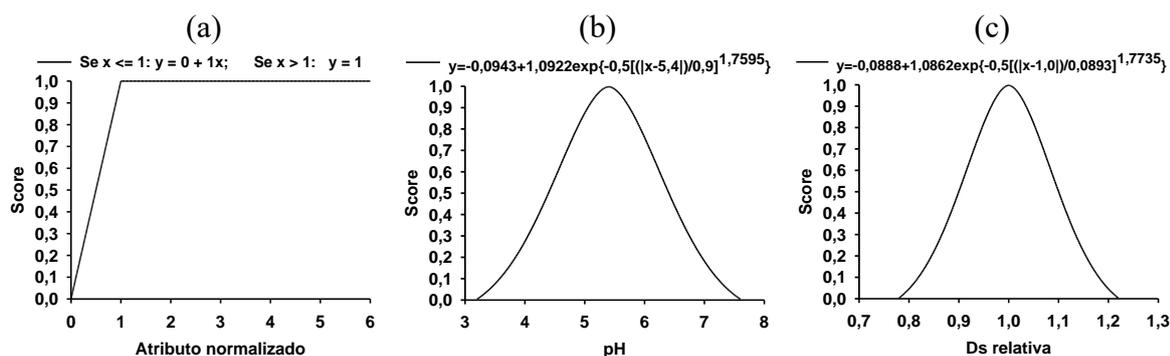


Figura 2. Curvas de pontuação para os indicadores de qualidade do solo, utilizada nos atributos normalizados que quanto o maior valor é melhor, até o limite superior (se $x \leq 1$: $y = x$), para MOS, P, K, β -glicosidase e profundidade de Ca, RP e COT (a); “ponto ótimo” para o pH (b) e densidade benéfica relativa do solo (c).

Para tanto, foram determinados para cada indicador os limites inferior (LI = 0), de base superior (LBS = 0,5) e superior (LS = 1), quando possuía um valor máximo baseado em valores de referência definidos pela literatura ou equações ajustadas. Ademais, um valor ótimo, além do limite de base inferior (LBI = 0,5), quando o atributo em questão possuía um valor ideal (Tabela 1).

Tabela 1. Tipo de curva e pontuação utilizadas para avaliar e transformar os indicadores de qualidade do solo em uma escala de zero a um pelos critérios estabelecidos.

Indicador	Pontuação	Camada	Critério	LI	LS	LBI	LBS	Ótimo	Referência
pH	"0 é 1"	0-0,20 m	pH em CaCl ₂	3,5	7,5	4,5	6,5	5,5	Malavolta et al. (1997)
		0-0,10 m	Teor adequado para sequeiro	0	$0,00001 \text{argila}^2 - 0,0382 \text{argila} + 30,828$	50%LS	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
		0,10-0,20 m	Teor médio para sequeiro	0	$0,00001 \text{argila}^2 - 0,0290 \text{argila} + 22,660$	50%LS	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
P	"+ é 1"	0-0,10 m	Teor adequado para irrigado	0	$0,00003 \text{argila}^2 - 0,0697 \text{argila} + 50,147$	50%LS	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
		0,10-0,20 m	Teor médio para irrigado	0	$0,00001 \text{argila}^2 - 0,0382 \text{argila} + 30,828$	50%LS	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
K	"+ é 1"	0-0,20 m	Teor alto para CTC < 4 cmolcdm ⁻³	0	40	20	--	--	Sousa e Lobato (2004)
		0-0,20 m	Teor alto para CTC > 4 cmolcdm ⁻³	0	80	40	--	--	Sousa e Lobato (2004)
MOS	"+ é 1"	0-0,10 m	Teor alto	0	$-0,00006 \text{argila}^2 + 0,1078 \text{argila} - 0,2241$	50%LS	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
β glico	"+ é 1"	0-0,10 m	Teor adequado	0	226	113	--	--	Lopes et al.(2018)
Ds rel	"0 é 1"	0-0,30 m	Condição estrutural do solo	0,8Dsb	1,2Dsb	0,9Dsb	1,1Dsb	(Dsb)1,6643-0,00081Argila	Severiano et al. (2011)
Ca-Perfil	"+ é 1"	0-0,60 m	Camada em que o teor é adequado	0	0,60	0,30	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
MOS-Perfil	"+ é 1"	0,10-0,60 m	Camada subsuperficial em que o teor é médio	0,10	0,60	0,30	--	--	Sousa e Lobato (2004)*
RP-Perfil	"+ é 1"	0,30-0,60 m	Camada subsuperficial de maior impedimento	0,30	0,60	0,45	--	--	Opinião de especialista

MOS: matéria orgânica do solo (g kg⁻¹); P: fósforo (mg dm⁻³); K: potássio (mg dm⁻³); pH: potencial hidrogeniônico em CaCl₂ (adimensional); β glico: atividade da enzima β-glicosidase (μgPNFg solo seco⁻¹ h⁻¹); Argila do solo expressa em g kg⁻¹; Ds rel: densidade do solo relativa para condição benéfica (adimensional); Ca-Perfil: profundidade do solo com teor adequado de cálcio no perfil (m); MOS-Perfil: profundidade do solo com teor médio de matéria orgânica do solo (m), determinado pela equação $-0,00003 \text{argila}^2 + 0,057 \text{argila} - 0,0484$; RP-Perfil: profundidade subsuperficial com maior resistência do solo à penetração (m). * Equação ajustada a partir dos valores de referência proposto pelos autores citados . LI: limite inferior; LS: limite superior; LBI: limite de base inferior; LBS limite de base superior; O: valor ótimo.

A integração dos IQ-atributos foi realizada por meio de somatório ponderado (Eq. 1), conforme as instruções de Marion *et al.* (2022), agrupando-os como aspectos edáficos (AE) químicos (AE-Química): IQ-pH, IQ-P (média das duas camadas) e IQ-K; biológicos (AE-Biologia): IQ-β glico e IQ-MOS (a 0-0,10m); físicos (AE-Física): IQ-Ds rel (entre 0,10-0,30m) e; em perfil (AE-perfil): IQ-Ca perfil (camada em que o teor esteve adequado), IQ-MOS Perfil (camada em que o teor esteve médio) e IQ-RP Perfil (camada subsuperficial de maior impedimento). Por fim, o índice de qualidade do solo em perfil (P-IQS) foi calculado também seguindo as recomendações destes autores.

$$IQ = \sum_{n-1}^n Si \times Pi \quad \text{Eq. 1}$$

em que, Si é o score do indicador i (zero a um) e Pi é o peso do indicador i.

2.5. Análises estatística

Os resultados dos atributos de solo foram submetidos à estatística descritiva e à análise de correlação de Pearson (r) e para interpretação foi aceita como: baixa se $r < |0,39|$, moderada quando $|0,40 < r < 0,69|$ ou alta para $r > |0,70|$. Foi realizada a regressão múltipla de P-IQS em função dos IQ-atributos e realizada a análise dos resíduos, que incluiu a verificação de normalidade, homogeneidade e correlação. Para isso, foram utilizados os testes de Shapiro-Wilk, Levene e Durbin-Watson, aplicados pelos pacotes stats, car e lmtest, respectivamente, no programa R.

Além disso, foi realizada a análise do coeficiente de determinação parcial para cada variável independente com o objetivo de avaliar a importância relativa de cada IQ-atributo no modelo. Essa análise permite identificar a contribuição específica de cada variável na explicação da variabilidade do P-IQS, controlando o efeito das demais variáveis do modelo.

Os escores de AE e P-IQS em cada fazenda foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento em blocos ao acaso, e ao teste de Scott-Knott (5%), quando constatada significância. A interpretação dos escores foi realizada na seguinte escala: baixo se $< 0,59$, moderado quando $0,60 < r < 0,79$ ou alto para $> 0,80$.

3. Resultados

Os resultados da estatística descritiva dos atributos químicos, físico e biológicos, indicadores de qualidade do solo das fazendas avaliadas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Momentos estatísticos das características físicas e dos atributos indicadores de qualidade do solo em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.

Variável	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	Coefficiente de Variação	Mínimo	Máximo
Areia	341	244	39	72	49	899
Silte	278	141	22	51	21	546
Argila	585	217	17	37	80	871
pH	4,8	0,4	0,1	8	3,96	5,70
P (0-0,10 m)	13,6	21,3	3,4	157	0,6	135,4
P (0,10-0,20 m)	5,2	11,6	1,8	222	0,1	74
K	73	39	6	53	3	228
Ca (0-0,10 m)	2,7	1,1	0,2	40	0,7	5,6
Ca (0,10-0,20 m)	1,8	0,8	0,1	44	0,6	4,4
Ca (0,20-0,40 m)	1,5	0,6	0,1	44	0,5	3,9
Ca (0,40-0,60 m)	1,4	0,7	0,1	52	0,5	3,3
Ca perfil	0,58	0,08	0,01	14	0,10	0,60
CTC	5	1		21	3	8
MOS (0-0,10 m)	31	9	1	28	12	53
MOS (0,10-0,20 m)	26	7	1	28	11	43
MOS (0,20-0,40 m)	22	6	1	27	9	33
MOS (0,40-0,60 m)	18	5	1	26	7	27
MOS perfil	0,31	0,14	0,02	45	0,10	0,60
β glico	188	84	13	45	14	375
Ds	1,29	0,14	0,02	11	1,09	1,60
Profundidade de RP	0,22	0,07	0,01	31	0,09	0,39
RP-Perfil	0,48	0,12	0,02	25	0,30	0,60

Textura do solo: Areia (partículas entre 2.00-0.05 mm), silte (0.05-0.002 mm) e argila (< 0.002 mm) (g kg⁻¹); pH: potencial hidrogeniônico em CaCl₂ na camada de 0-0,20 m (adimensional); P: fósforo nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente (mg dm⁻³); K: potássio na camada de 0 a 0,20 m (mg dm⁻³); Ca: cálcio nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (cmolc dm⁻³); Ca-Perfil: ; CTC: capacidade de troca catiônica (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺ + H⁺ + Al³⁺) na camada de 0-0,20 m (cmolc dm⁻³); MOS: matéria orgânica do solo nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (g kg⁻¹); MOS-Perfil: ; β glico: atividade da enzima β -glicosidase na camada de 0-0,10 m (μ gPNFg solo seco⁻¹ h⁻¹); Ds: maior valor de densidade do solo na camada de 0,10-0,30 m (kg dm⁻³); RP-Perfil: profundidade do solo (m) com a maior resistência à penetração até 0,6 m.

As correlações de Pearson são majoritariamente fracas ($r < |0,39|$), exceto em dois grupos de atributos: - MOS à 0-0,10 m e β -glicosidase e a Ds relativa à 0,10-0,30 m e; - K a 0-0,20 m e P (0-0,10 e 0,10-0,20 m), cuja correlação foi moderada ($|0,40| < r < |0,69|$) e, ainda, forte entre as camadas de P, com $r > |0,70|$ (Figura 2 ou 3).

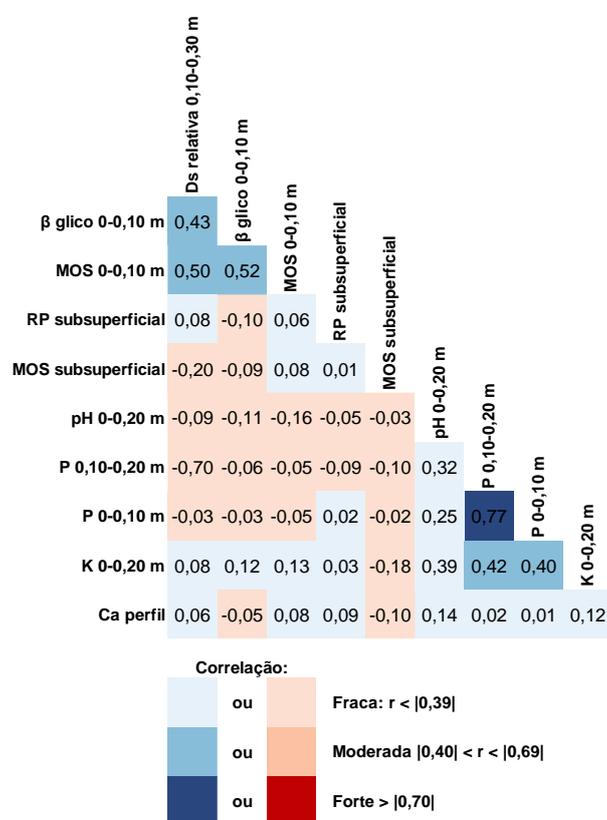


Figura 3. Correlação de Pearson entre os atributos de qualidade do solo em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.

pH 0-0,20: potencial hidrogeniônico em CaCl_2 (adimensional) na camada de 0-0,20 m; P 0-0,10 e P 0,10-0,20 (mg dm^{-3}): fósforo nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente; K 0-0,20 (mg dm^{-3}): potássio na camada de 0-0,20 m; MOS 0-0,10: matéria orgânica do solo (g kg^{-1}) na camada de 0-0,10 m; β glico 0-0,10: atividade da enzima β -glicosidase ($\mu\text{gPNFg solo seco}^{-1} \text{h}^{-1}$) na camada de 0-0,10 m; Ds relativa (adimensional) 0,10-0,30: densidade do solo relativa na camada de 0,10-0,30 m; Ca perfil (m): camada do solo com teor adequado de cálcio ($> 0,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$) até a profundidade de 0,6 m; MOS perfil: camada do solo abaixo da superfície (0,10 m) com teor médio de matéria orgânica do solo até a profundidade de 0,6 m; RP perfil: camada do solo abaixo de 0,30 m com o maior impedimento mecânico ao penetrômetro até a profundidade de 0,6 m.

A análise de regressão múltipla estimou P-IQS a partir dos nove IQ-atributos e com pesos distintos entre os indicadores, conforme apresentado na Figura 4. Esta modelagem foi capaz de prever a qualidade/saúde do solo com alta precisão (Figura 5).

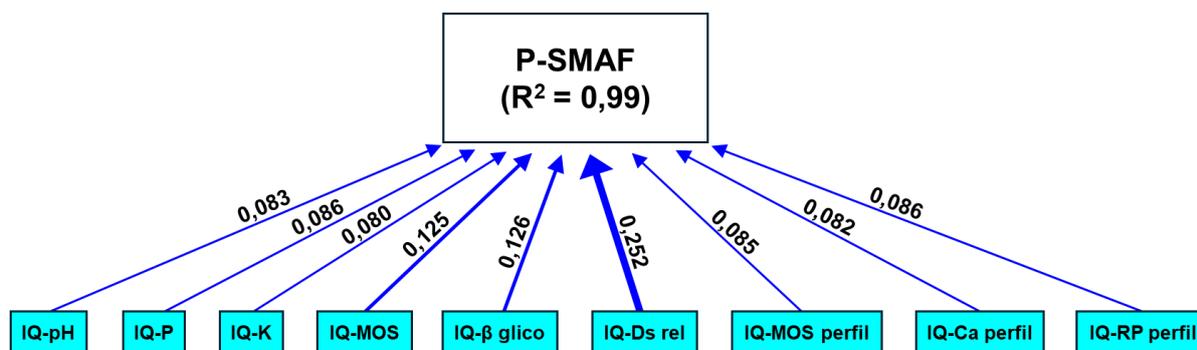


Figura 4. Relações de regressão múltipla entre índices de qualidade dos atributos do solo (IQ-atributos) e o índice avaliação do manejo do solo em perfil (P-IQS) com os coeficientes de regressão, em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.

IQ-pH: índice de qualidade referente ao pH do solo; IQ-P: índice de qualidade referente ao fósforo do solo; IQ-K: índice de qualidade referente ao potássio do solo; IQ-MOS: índice de qualidade referente a matéria orgânica do solo; IQ-β glico: índice de qualidade referente a enzima β-glicosidase do solo; IQ-Dsrel: índice de qualidade referente a densidade do solo; IQ-MOS perfil: índice de qualidade referente a matéria orgânica no perfil do solo; IQ-Ca perfil: índice de qualidade referente ao cálcio do perfil solo; IQ-RP perfil: índice de qualidade referente a resistência penetração no perfil do solo do solo.

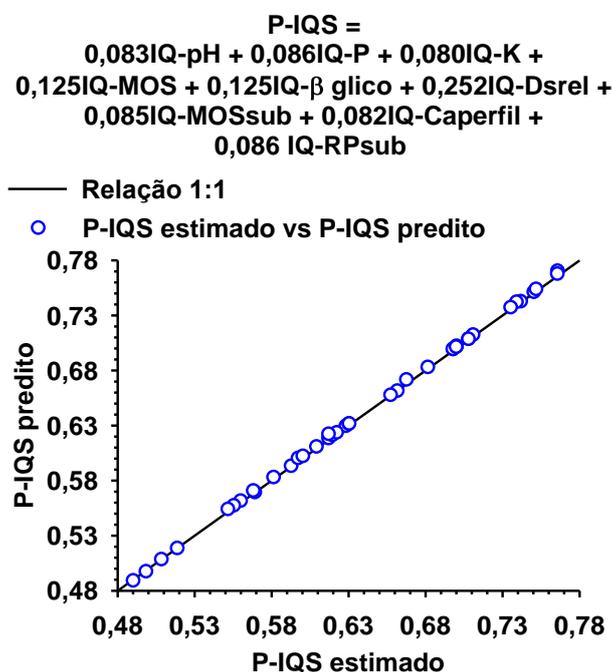


Figura 5. Relação entre os valores observados do índice de avaliação do manejo do solo em perfil (P-IQS) e estimados a partir dos índices de qualidade dos atributos do solo (IQ-atributos), em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.

IQ-pH: índice de qualidade referente ao pH do solo; IQ-P: índice de qualidade referente ao fósforo do solo; IQ-K: índice de qualidade referente ao potássio do solo; IQ-MOS: índice de qualidade referente a matéria orgânica do solo; IQ-β glico: índice de qualidade referente a enzima β-glicosidase do solo; IQ-Dsrel: índice de qualidade referente a densidade do solo; IQ-MOS perfil: índice de qualidade referente a matéria orgânica no perfil do solo do solo; IQ-Ca perfil: índice de qualidade referente ao cálcio do perfil solo; IQ-RP perfil: índice de qualidade referente a resistência penetração no perfil do solo.

A importância relativa de cada IQ-atributo padronizado (todas as variáveis na mesma escala) em P-IQS é apresentada na Figura 6 e possibilita a comparar o impacto de cada uma sob variável dependente. Observa-se que IQ-Ds rel responde por mais de 55% da variabilidade total dos resultados, seguida por IQ- β glico (13%) e IQ-P (8%), ao passo que as demais variáveis representaram apenas, entre 1 e 6% da variabilidade total.

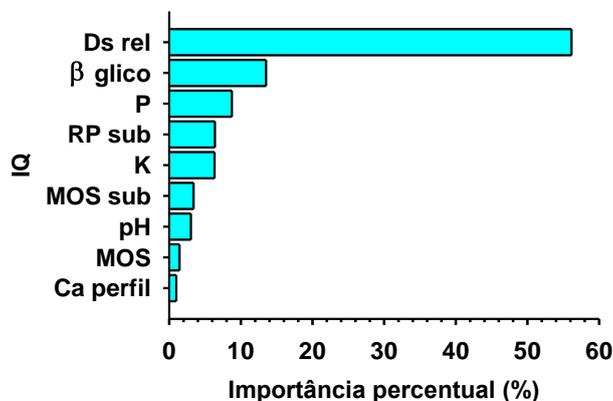


Figura 6. Importância relativa dos indicadores de qualidade dos atributos do solo (IQ-atributos) na determinação do índice avaliação do manejo do solo em perfil (P-IQS), em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.

IQ-pH: índice de qualidade referente ao pH do solo; IQ-P: índice de qualidade referente ao fósforo do solo; IQ-K: índice de qualidade referente ao potássio do solo; IQ-MOS: índice de qualidade referente a matéria orgânica do solo; IQ- β glico: índice de qualidade referente a enzima β -glicosidase do solo; IQ-Dsrel: índice de qualidade referente a densidade do solo; IQ-MOS perfil: índice de qualidade referente a matéria orgânica no perfil do solo do; IQ-Ca perfil: índice de qualidade referente ao cálcio do perfil solo; IQ-RP perfil: índice de qualidade referente a resistência penetração no perfil do solo.

O agrupamento das fazendas pelo teste Scott-Knott aponta a heterogeneidade dos pedoambientes de alta performance da cultura da soja, com P-IQS médio de 0,63 e variando de baixo (0,49) a moderado (0,77) (Figura 7). Os escores foram distribuídos em três grupos, o grupo “a” com 19 fazendas e média 0,71 (0,66-0,77), conseguintes com 12 (grupo “b”) e 9 (grupo “c”) fazendas com médias de 0,61 e 0,54, e amplitude de 0,58-0,63 e 0,49-0,57, respectivamente.

Na composição de P-IQS (Figura 7A), enquanto AE-Perfil apresentou-se como o de maior homogeneidade, com variação de escores entre 56 a 76% do total (isto é, em 0,253 - Figura 5) e com valores médios de fazendas no grupo “a” = 0,19 e no grupo “b” = 0,14, AE-Química apresentou variações de 36 a 88% (fazendas de grupo “a” = 0,22, grupo “b” = 0,18, grupo “c” = 0,15 e grupo “d” = 0,09), seguidos de AE-Biologia que se apresentam com 56 a 92% (grupo “a” = 0,23, grupo “b” = 0,18, grupo “c” = 0,17 e grupo “d” = 0,14) e de AE-Física como sendo o de maior heterogeneidade, cuja variação total foi 4 a 84% (grupo “a” = 0,21, grupo “b” = 0,16, grupo “c” = 0,08 e grupo “d” = 0,01) e com cinco fazendas com score 0.

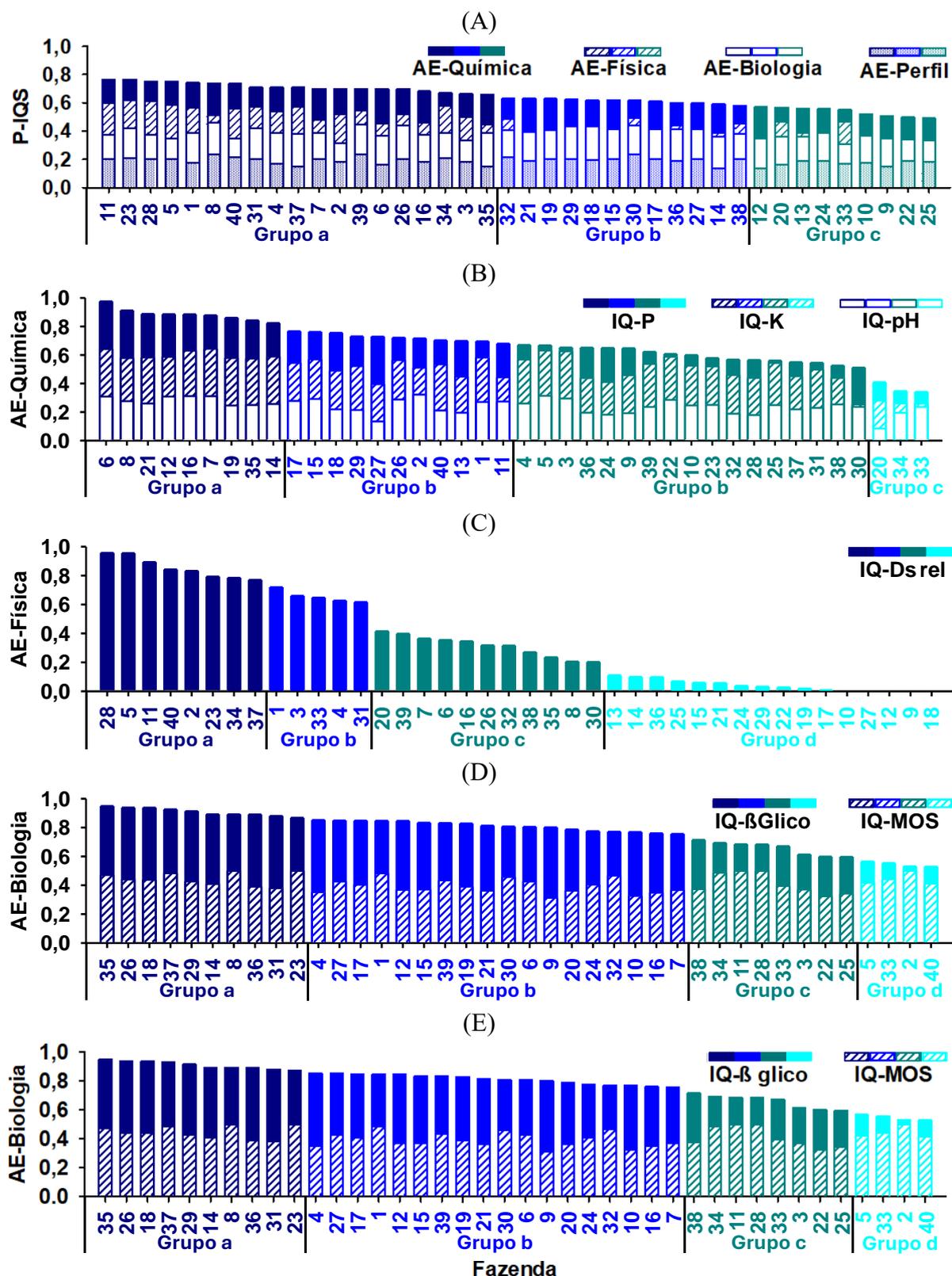


Figura 07. Índices avaliação do manejo do solo em perfil (A, P-IQS) e de qualidades do solo, química (B, AE-Química), física (C, AE-Física), biológica (D, AE-Biologia) e de perfil (E, AE-Perfil) agrupados pelo teste Scott-Knott (5%), em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.

Em cada componente de P-IQS contribui com 0,25 do score total, AE-Química e AE-perfil, com 0,33, AE-Biologia com 0,5 e AE-Física com 1,0.

Dentre os AEs, química, física e biologia foram distribuídos em quatro grupos, porém com fazendas distintas em cada um [químico: grupo “a” com nove fazendas com altos escores (0,82-0,98), “b” com 11 fazendas com escores moderados (0,68-0,77), “c” com 17 (0,51-0,67) e “d” com 3 (0,34-0,41) fazendas de baixos escores (Figura 7B); Físico: “a” com oito fazendas com escores de moderado a alto (0,77-0,96), “b” com cinco fazendas com escores moderados (0,62-0,72), “c” com 11 fazendas (0,20-0,42) e “d” com 16 fazendas (0,00-0,11), cujos escores foram muito baixos (Figura 7C) e; biológico: “a”, 10 fazendas com escores altos (0,87-0,95), “b” com 18 fazendas de moderado a alto escores (0,76-0,85), “c” com oito fazendas com escores moderados (0,60-0,71) e “d” com quatro fazendas cujos escores foram baixos (0,53-0,56) (Figura 7D)]. Por fim, três grupos foram encontrados em AE-perfil, os grupos “a” com 25 fazendas com escores de moderado a alto (0,76-0,95), “b” com 10 fazendas com escores moderados (0,66-0,73) e “c” com cinco fazendas cujos escores foram baixos (0,60-0,54) (Figura 7E).

No primeiro grupo de P-IQS, e apesar dos altos escores, nenhuma propriedade teve os quatro IQ-atributos no grupo “a”, as fazendas 8 e 23 destacaram-se com três escores também no grupo “a” (a primeira em AE-Química, AE-Biologia e AE-Perfil e a segunda fazenda em AE-Biologia, AE-Física e AE-Perfil), enquanto as fazendas 1, 3 e 4 não apresentaram nenhum indicador neste grupo. As demais fazendas apresentaram um ou dois IQ-atributos nos grupos de maiores escores. Nas de menores (C), em alguns casos, observa-se elevados escores em alguns AEs (12 e 13, por exemplo, destacaram-se, respectivamente, em AE-Química e AE-Perfil no grupo “a” de fazendas, além de AE-Biologia e AE-Química no grupo “b”).

Em AE-Química, não há um padrão restritivo (Figura 7B). No grupo “a” de fazendas houve o maior equilíbrio entre os indicadores avaliados, com altas contribuições dos escores [84 a 96% do total, sendo IQ-pH = 0,28, IQ-P = 0,28 e IQ-K = 0,32 (em 0,33)], seguido do grupo “b” com contribuições de 63 a 82% (IQ-pH = 0,24, IQ-P = 0,21 e IQ-K = 0,27) e ao passo que no grupo “c” as contribuições foram de 32 a 77%, sendo o fósforo o fator mais limitante (IQ-pH = 0,24, IQ-P = 0,11 e IQ-K = 0,26). As fazendas do grupo “d” tiveram mais restrições em todos os IQ-atributos avaliados, cujas contribuições variaram entre 28 e 51% (IQ-pH = 0,17, IQ-P = 0,10 e IQ-K = 0,09).

Nos dois IQ-atributos constituintes de AE-Biologia, IQ-MOS contribuiu satisfatoriamente em aproximadamente 80 a 90% em todos os grupos (Figura 7C). IQ- β glico foi que governou o comportamento em questão, em que as fazendas de grupo “a” e “b” tiveram elevada atividade enzimática [0,46 e 0,42 (em 0,5), respectivamente], seguidas de menores escores em fazendas do grupo “c” (0,25) e “d” (0,10) (Figura 7C).

AE-Física resultou nas maiores restrições na maioria das fazendas estudadas (Figura 7D), enquanto a acidez subsuperficial em AE-perfil apresentou contribuição de IQ-Ca perfil > 90% (Figura 7E). A compactação em subsuperfície afetou apenas o grupo “c” de fazendas, em que IQ-RP perfil apresentou escores inferiores à P-IQS ao passo que a MOS perfil ocorreram as maiores restrições em profundidade [IQ-MOS sub = 0,17, 0,09 e 0,11 (em 0,33) e nas fazendas de grupos “a”, “b” e “c”, respectivamente].

4. Discussão

4.1. Aspectos de avaliação do manejo do solo em perfil

A aplicação conceitual da saúde do solo em sistemas agropecuários tem quantificada a resposta ao uso sob os atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Bunemann *et al.*, 2018), isolados (Severiano *et al.*, 2011; Nunes *et al.*, 2020; Torino *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021; Bonetti *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2023; Serafim *et al.*, 2023) ou integrados em um único índice (Cherubin *et al.*, 2017; Marion *et al.*, 2022; Chang *et al.*, 2023). No entanto, é desafiador compreender as interações das práticas agrícolas nos aspectos edáficos, ainda mais quando os resultados encontrados neste estudo constatarem a heterogeneidade dos solos expressa pelos atributos avaliados em pedoambientes de alta performance das fazendas de soja, com solos de areias francas a muito argilosos (Anexo 1) e com variações de 0,5 (no caso do pH e Ds) à 740 vezes (P a 0,10-0,20 m) nos atributos avaliados (Tabela 2). Assim, é limitada a definição de um valor absoluto de referência na maioria dos indicadores.

Por outro lado, os solos avaliados apresentam elevada uniformidade morfológica, sendo muito intemperizados e recobrindo grandes áreas nos trópicos, particularmente no Brasil (Marques *et al.*, 2004; Severiano *et al.*, 2013). Pela mineralogia simplificada (caulinita e óxidos de ferro e alumínio na fração argila), é consenso que as respostas agrônômicas sejam frequentemente validadas para a textura do solo (Caires *et al.*, 2003; Sousa e Lobato, 2004; Severiano *et al.*, 2011). Este foi o principal critério para determinação do tipo de curva e da pontuação utilizada na avaliação dos seguintes indicadores de qualidade: matéria orgânica do solo, fósforo, potássio (neste caso, acatando a interação da argila à capacidade de troca catiônica) e densidade relativa. Já os demais foram baseados em valores de referência preestabelecidos em literatura ou foram pautados em opinião de especialistas (Tabela 1), conforme as instruções de Marion *et al.* (2022).

Estes autores, definindo estratégias de diferentes complexidades de determinação de um

índice de qualidade do solo a partir de um conjunto de dados com 30 atributos de solo, concluíram que o uso de média ponderada de um número reduzido de variáveis (ex: pH, fósforo, densidade do solo relativa e carbono orgânico total) é um protocolo potencialmente tecnológico, eficaz e de baixo custo para avaliação do manejo. Este protocolo corrobora com Cherubin *et al.* (2017), Nunes *et al.* (2020) e Zhu *et al.* (2024), que adotaram um número reduzido de atributos e, desta forma, foi adotada como critério neste estudo.

A definição de atributos indicadores-chaves, portanto, passa pelo conhecimento pedológico e do subsídio da literatura, devendo ser em número pequeno, mas que devem englobar os entraves enfrentado pelos fazendeiros. Por isso, a quantidade de atributos representantes dos aspectos químicos, físicos e biológicos do solo podem variar e, embasando a discussão, Bunemann *et al.* (2018) e Simon *et al.* (2022), ao analisarem resultados de solos brasileiros e do mundo, constataram dentre outros, a matéria orgânica do solo, a densidade do solo, o fósforo, o pH, o cálcio, a resistência à penetração e a atividade enzimática em aproximadamente 95, 80, 80, 80, 70, 55, 40 e 25% dos estudos, respectivamente - estes são, seguramente, os principais desafios na produção agropecuária tropical. Como vantagem analítica, apresentam exequibilidade de avaliação em larga escala e contam com a rede de apoio de laboratórios de solos prestadores de serviços na obtenção dos resultados e na definição de relações com os padrões técnicos pré-estabelecidos, de modo a possibilitar uma linguagem comum entre agricultores, extensionistas e cientistas.

Pesquisas envolvendo a avaliação da saúde do solo têm se restringido às camadas superficiais do solo, geralmente isoladas e não ultrapassando 0,30 m de profundidade (Cherubin *et al.*, 2016; Luz *et al.*, 2019; Ruiz, *et al.*, 2020; Bonetti *et al.*, 2023; Chang *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2023). Esta abordagem quando realizada em profundidade no perfil do solo de maneira integrada e associada à dinâmica dos nutrientes e do carbono, à atividade biológica e à resposta ao tráfego agrícola pode representar uma alternativa promissora na avaliação da saúde do solo e sendo sugerida como uma estrutura de avaliação da qualidade do solo em decorrência do manejo, em perfil agrônomico (P-IQS). Por isso, foram integrados os 19 atributos avaliados (Tabelas 1 e 2) em 10 variáveis e 9 IQ, respectivamente, nas análises de correlação (Figura 3) e na modelagem do índice (Figura 4). O enfoque se deu no condicionamento do solo para o estabelecimento de uma frente de enraizamento das plantas (práticas agrícolas que viabilizam o desenvolvimento radicular em profundidade) convergente à manutenção dos serviços ambientais (notadamente aqueles relacionados ao ciclo hidrológico e ao sequestro de carbono).

As variáveis analisadas em camadas distintas não se correlacionaram na maioria dos casos (Figura 3), por atuarem como resposta a práticas de manejo específicas, mas igualmente

importantes para o desenvolvimento das plantas cultivadas. Segundo Severiano *et al.* (2013) e Lopes e Guilherme (2016), a maioria dos solos tropicais agricultáveis apresentam restrições químicas ligadas à acidez potencial, baixa fertilidade natural e elevada toxidez por alumínio, mas são, em contrapartida, profundos e dotados de elevada estabilidade estrutural e friabilidade, embora muito suscetíveis à compactação. A definição pH, P e K como indicadores de qualidade química (Tabela 1) constituem as principais bases do manejo da fertilidade destes. Em pesquisas realizadas no Cerrado Brasileiro por 27 anos, Sousa e Lobato (2004) definiram valores de referência para interpretação destes atributos e para recomendação de corretivo e fertilizantes e, devido a relevância destes estudos, foram utilizados neste trabalho com as devidas modificações apresentadas na Tabela 1, abordadas a seguir.

A exploração agropecuária inicia-se com a correção da acidez por meio da calagem (aplicação de calcário, um corretivo à base de CaCO_3 e MgCO_3) que atua principalmente na camada superficial (0-0,20 m, segundo Caires *et al.*, 2003) e que, além da elevação no pH, aumenta a disponibilidade dos macronutrientes secundários (cálcio e magnésio, consequentemente eleva a saturação por bases), regula a disponibilidade de micronutrientes catiônicos e melhora a atividade microbiológica associada à mineralização da matéria orgânica do solo e à regulação da redundância funcional (Costa e Crusciol, 2016, Mendes *et al.*, 2019). Também gera cargas elétricas do solo (capacidade de troca catiônica), aumentando a eficiência de adubações, e neutraliza o alumínio tóxico (reduz a saturação por alumínio). A definição pelo pH em CaCl_2 como atributo representativo do manejo da acidez do solo ocorre, portanto, pela influência direta ou indireta na disponibilidade da maioria dos nutrientes quando estiver próximo ao valor ótimo de 5,5, e contribui para a maior produtividade das culturas em solos corrigidos (Malavolta *et al.*, 1997) por associar aos benefícios anteriormente citados. Por definição, contempla indiretamente outros atributos utilizados na avaliação química de solos apontados por Bunemann *et al.* (2018) e Simon *et al.* (2022).

O cálcio em profundidade, por sua vez, geralmente é adicionado via fertilizantes e pela gessagem (gesso agrícola, CaSO_4), que inclusive adicionam enxofre e neutralizam o alumínio nas camadas subsuperficiais pelo estabelecimento de uma frente de neutralização do alumínio (Caires *et al.*, 2003; 2008), cuja identificação é feita por camadas com teores deste nutriente acima dos valores de referência [$\text{Ca} > 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, estabelecido por Sousa e Lobato (2004)]. Torna-se relevante a circunstância de a agropecuária tropical de sequeiro ser dependente da pluviometria e que, embora muito favorável em termos de volume, é afetada por irregularidades quanto a distribuição, notadamente no período transição entre o verão e o outono, que no Brasil é a época da segunda safra (Cruz *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2021).

Quando Torino *et al.* (2020) avaliaram a performance agronômica do milho (principal cultivo neste período) houve uma condição extrema de 62 dias sem chuvas no período equivalente ao florescimento e enchimento de grãos, levando a quebra de produtividade. Neste mesmo estudo, os autores relataram que a produtividade média desta cultura foi 29%, inferior em relação ao ano anterior, cuja pluviometria havia sido regular e sem a ocorrência de veranico e isto tem motivado os fazendeiros a investirem na prática em discussão (Caires *et al.*, 2003; Costa e Crusciol, 2016). Em adição, a adoção de técnicas de irrigação na produção de grãos no verão/outono assume caráter suplementar (irrigação de salvamento), visando minimizar os eventuais efeitos de déficits hídricos (somente na safra de inverno é que se realiza a agricultura irrigada) e, por este motivo, considera-se igualmente importante o manejo do solo em subsuperfície nas lavouras irrigadas a fim de aumentar a eficiência do uso da água de recarga natural e, conseqüentemente, reduzir os custos de produção associados à irrigação.

As correlações moderadas entre P e K e forte entre as camadas de P (Figura 3) indicam que embora resultantes de dinâmicas no solo (conseqüentemente analisadas em camadas distintas) e planos de adubação independentes (adubação a lanço e/ou no sulco de plantio), há aqui os maiores esforços pelos agricultores no manejo da fertilidade do solo, em relação aos demais fatores de manejo. Isto por que há o maior conhecimento científico acerca das desordens nutricionais nos solos (Lopes e Guilherme *et al.*, 2016) e aos métodos de diagnoses e recomendações que já são de domínio público (Silva *et al.*, 2021), mas com elevados investimentos em insumos e com a dependência de mercados internacionais [a agricultura brasileira, por exemplo, importa até 60% do P e mais do 90% de K utilizado, segundo a FAO (2022)].

O P é o nutriente mais limitante na agricultura tropical, não somente pela natural escassez (Novais e Smyth, 1999; Fink *et al.*, 2014), mas pela forte interação com os óxidos de Fe (notadamente hematita e goethita) comumente presente em teores elevados nos solos (Marques *et al.*, 2004; Severiano *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2021), aumentando sobremaneira a adsorção iônica (Corrêa *et al.*, 2011) e reduzindo muito a mobilidade deste elemento, conseqüentemente, a disponibilidade às plantas. Estudos complementares apontam a necessidade da correção em camadas subsuperficiais (não tão profunda quanto as camadas corrigidas com Ca mas, além de 0-0,10 m, na camada de 0,10-0,20 m), resultando em ganhos de vigor nas plantas cultivadas pelo arranque inicial e pela maior eficiência do uso da água quando em condições de déficit hídrico (Kang *et al.*, 2014), embora as discussões acerca do manejo da fertilidade do solo como ação mitigadora de veranico vão além da referida camada, como já discutido.

A aplicação contínua de fertilizantes fosfatados a lanço em superfície leva o estabelecimento de gradiente de concentração do nutriente nos primeiros 0,10 m ou mais raso em sistemas conservacionistas, em decorrência da ciclagem deste nutriente (Silva *et al.*, 2024) e com a conseqüente redução nas camadas subsuperficiais, seja pela absorção pelas plantas ou pela fixação aos sítios de adsorção. Todavia, quando realizada no sulco de plantio há ganhos de eficiência nutricional seja pela redução das perdas por erosão (Hansel *et al.*, 2019) ou pela formação de gradiente de concentração do elemento favorável às plantas, neste caso restrito ao solo do interior do sulco. A distribuição homogênea deste nutriente ao longo das camadas superficiais e subsuperficiais constitui-se, talvez, no maior desafio à fertilidade de solos tropicais e a maior eficiência agrônômica da adubação em sulco de plantio contrapõe-se ao maior rendimento operacional da distribuição a lanço e antecipada do nutriente quando do manejo da adubação (Oliveira *et al.*, 2022). Por este motivo, adotamos como critério de qualidade os teores estabelecidos por Sousa e Lobato (2004), que são adequados na camada superficial (0-0,10 m) e médio para subsuperficial (0,10-0,20 m). Por fim, estes autores assumem o maior potencial produtivo de áreas irrigadas na interpretação da disponibilidade de P, de modo semelhante ao realizado neste presente estudo (Tabela 1).

O potássio, pela maior mobilidade no solo, tem sido analisado na camada de 0-0,20 m (Fernández e Schaefer, 2012; Oliveira *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2024), com a aplicação de fertilizantes contendo o nutriente comumente sendo realizada a lanço antecedendo a operação de semeadura (Hansel *et al.*, 2019). Segundo Sousa e Lobato (2004), a capacidade de troca catiônica é assumida como o critério de definição de valores de referência (Tabela 1), cujos resultados para este atributo foram analisados pelos momentos estatísticos (Tabela 2) e não como indicador de qualidade química do solo no estudo.

Trata-se de um nutriente cuja agricultura brasileira apresenta vulnerabilidade nas relações internacionais em quase a sua totalidade (Moraes, 2014; Mancuso *et al.*, 2014). Por assim ser, é oportuno e necessário que o índice de qualidade do solo seja pautado em altos teores do nutriente na referida camada (Tabela 1), em contraposição à ocorrência de áreas com resultados muito superiores aos estabelecidos (há fazendas com até três vezes mais disponibilidade do nutriente em relação ao valor de referência - Tabela 2). Esta constatação caracteriza o uso indiscriminado de insumos por alguns fazendeiros, cujas respostas agrônômicas nem sempre são obtidas e, ainda pelas altas doses geralmente não provocarem reduções no rendimento das culturas pela fitotoxidez do nutriente. Foi o que nos levou ao uso da curva de pontuação para atributos avaliados que quanto maior o valor é melhor, até o limite superior de referência (linear com platô - Figura 2).

As relações da matéria orgânica superficial com a atividade enzimática e com o estado de compactação do solo nas primeiras camadas estão destacadas pelas correlações moderadas entre estes atributos (Figura 3). É notória a importância das frações orgânicas no desempenho de várias funções químicas (geração de cargas elétricas, reserva nutricional, ciclagem da energia e da matéria, complexação de metais tóxicos, ação tamponante da acidez), físicas (agregação, infiltração e retenção de água, controle da erosão, estruturação do solo) e biológicas que regulam a produção agropecuária, além de alguns processos ecossistêmicos (Doran e Parkin, 1994), e bem como de mitigação das mudanças climáticas pelo sequestro do carbono atmosférico (Mathew *et al.*, 2017). A MOS influencia os aspectos edáficos e ao mesmo tempo é influenciada por estes, fazendo com que a utilização como a estratégia de manejo assumam caráter prático em que a maior qualidade aumenta a capacidade produtiva do solo.

A matéria orgânica é o atributo condutor da qualidade biológica do solo, tanto nos estudos realizados no Brasil (Simon *et al.*, 2022) quanto no mundo (Bunemann *et al.*, 2018), uma vez que há favorecimento da atividade biológica ao consumir a MOS como substrato heterotrófico, da fragmentação física pelos organismos da macrofauna à decomposição microbiana (Marinari *et al.*, 2006; Marchão *et al.*, 2009). Tais funções dependem de atividades enzimáticas (ex: β -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) que desempenham os processos microbianos (Tabatabai, 1994; Martínez *et al.*, 2019). A β -glicosidase destaca-se por estar relacionada ao ciclo do carbono, sendo a última enzima no processo de despolimerização da celulose e, segundo Sobucki *et al.* (2021), esta atividade é um parâmetro adequado para avaliar a atividade microbiana, principalmente em condições agropecuárias tropicais (Mendes *et al.*, 2019). Ademais, as enzimas supracitadas correlacionam entre si (Barbosa *et al.*, 2023) e, no intuito de utilizar poucos indicadores, MOS e β -glicosidase são representantes da qualidade biológica (AE-Biologia, Tabela 1).

A correlação moderada entre MOS e Ds relativa ($r = 0,50$ - Figura 3) demonstra que, mesmo avaliadas em camadas sequenciais, os efeitos benéficos sob a estrutura e agregação sugerem respostas ao manejo conservacionista que não se restringem apenas às primeiras camadas do solo. Este comportamento é coerente às observações de Sá *et al.* (2013), que reportam, em inventário com vários solos e condições de uso e manejo, correlação moderada a forte entre densidade do solo e os conteúdos orgânicos independentemente das camadas estudadas. Para estes resultados, o aumento da Ds rel, calculado com base na Ds benéfica e por ser esta a condição que ocorre a máxima disponibilidade de água às plantas e sem nenhuma restrição de aeração ou de resistência mecânica (Severiano *et al.*, 2011), corresponde à condição estrutural ótima. Estes valores encontravam-se na maioria das fazendas, entre o ótimo e o LS

estabelecido pela figura 2 e tabela 1, o que se deva à altíssima suscetibilidade à compactação destes solos (Severiano *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2021), e estando de acordo às investigações de Aragón *et al.* (2000); Braida *et al.* (2006), Marcolin e Klein (2011) e Luciano *et al.* (2012).

Em adição, e de forma inovadora, utilizou-se com valor de referência para determinação da densidade relativa, a função de pedotransferência para densidade benéfica proposta por Severiano *et al.* (2011), que avaliando solos tropicais de mesma taxonomia, constataram que uma leve compactação destes Latossolos melhora o ambiente edáfico dada a altíssima porosidade sob condições naturais e por transformar parte dos macroporos em microporos, aumentando a retenção de água e o contato entre solo e raiz, sem contudo limitar os processos edáficos de transferência (ex: fluxo hídrico e trocas gasosas). A elevação de D_s relativa ao limite ótimo melhora as condições estruturais do solo (Figura 2) e promove a disponibilidade hídrica máxima para as plantas, assegurando ainda uma porosidade drenável satisfatória para os processos de infiltração de água e recarga hídrica.

Vale evidenciar ainda que a curva de pontuação aqui apontada para a qualidade física prediz condições estruturais além daquelas associadas à restrições [segundo as demais funções de pedotransferência definidas por Severiano *et al.* (2011) em seu estudo], compatíveis à solos soltos ou recém revolvidos no LI (0,8Ds) ou à solos degradados em LS (1,2Dsb), conforme a tabela 1. A densidade relativa, portanto, é um AE físico que reflete a estrutura do solo em todos os seus aspectos e que, neste estudo foi avaliado a partir de 0,10 m dada a ação mitigadora do manejo sob a estrutura do solo na camada superior. Em fazendas cultivadas sob plantio direto, o sulco aberto para deposição das sementes mobiliza o solo na linha de plantio, podendo romper a camada compactada nessa posição comparativamente à entrelinha (Correchel *et al.*, 1999). É o que foi demonstrado por Ferreira *et al.* (2023) que, avaliando o potencial de mecanismos de semeadoras na superação da compactação superficial em solos sob plantio direto, demonstraram benefícios na camada de 0-0,10 m com maior eficácia pelo uso da haste sulcadora em relação aos discos duplos. Estima-se mobilização de 25% do solo a cada plantio na referida camada, comumente com duas ou três operações a cada safra, no caso das lavouras tropicais de sequeiro ou irrigadas, respectivamente.

Faz-se necessário reconhecer inclusive a ativação biológica do solo como promotor de estruturação de solos, como feita por Marchão *et al.* (2009) ao observarem aumento expressivo na atividade faunística em profundidades superficiais do solo na seguinte ordem: pastagem contínua < lavoura contínua sob plantio direto < integração lavoura-pecuária = cerrado nativo, e com destaque para a alta densidade de Coleoptera, Formicidae, Myriapoda e Isoptera. Outros estudos mostram o papel das minhocas na formação de galerias e de agregados, bem como na

distribuição do tamanho dos poros, além de serem indicadores de boas práticas agrícolas (Blanchart *et al.*, 1997; Barros *et al.*, 2001 e Bartz *et al.*, 2013).

Os resultados demonstraram ocorrência majoritária da compactação superficial nas fazendas, via diagnóstico de campo com o uso do penetrômetro ($0,22 \pm 0,01$ m - Tabela 2; abaixo disso, apresentou em menor grau - vide anexo 2, anexo). A penetrometria assume o caráter preliminar de diagnose, dada a exequibilidade e obtenção de resultados em larga escala (não é fácil ou coerente a abertura de trincheiras profundas para avaliação de ocorrência da compactação complementar). Por esse motivo elencou-se a camada de máximo impedimento mecânico para o refinamento da qualidade física do solo, ao passo que o subsolo foi avaliado por meio da RP e computado em AE-perfil. De toda forma, eventuais ajustes por meio deste procedimento podem ser realizados a fim de englobar camadas mais ou menos profundas para a coleta de amostras indeformadas e sem alterar, novamente, a aplicabilidade metodológica.

Há, portanto, desafios não somente de ordem química (acidez potencial e deficiência de cálcio é a percepção do agricultor) para o enraizamento pleno das culturas anuais, bem como os físicos supracitados. A obtenção de um solo rico em cálcio e sem alumínio, mas sem compactação subsuperficial assume relevância no manejo de veranicos da agricultura tropical de sequeiro (Lima *et al.*, 2023). Igualmente importante na discussão é o aporte de matéria orgânica além da camada superficial, em profundidade, dadas as funções agronômicas (ex: retenção de água e de nutrientes lixiviados, complexação de alumínio tóxico às plantas e agregação do solo) e mesmo ambientais (o estoque de carbono constitui um serviço ambiental do solo na mitigação de gases de efeito estufa). Como a maioria das fazendas avaliadas possuem histórico de cultivo superior há 5 anos (a exceção é a fazenda 37, que se caracteriza como área de abertura e com apenas dois anos de implementação da agricultura), o AE-Perfil avaliando a Ca, MOS e compactação em subsuperfície até 0,60 m permitiram avaliar o impacto da profundidade no manejo adotado pelos fazendeiros refletem na saúde solo.

A qualidade do solo neste estudo visa melhores condições para o desenvolvimento das culturas sem a contrapartida da degradação ambiental e que se expressa, de fato, como a saúde do solo. Para isso, faz-se necessário manejá-lo de modo a obter um perfil agronômico, em contraposição ao manejo clássico superficial, geralmente na camada de 0-0,20 m. Espera-se respostas afetando as funções do solo nas camadas subsuperficiais e sugere-se avaliações até 0,6 m, corroborando às observações de Silva *et al.* (2015) e Silva *et al.* (2019), que constataram que as condições climáticas tropicais condiciona à conteúdos de água abaixo do ponto de murcha permanente das plantas cultivadas na camada de 0-0,4 cm sob veranico de 15 dias. De forma semelhante, Caires e Guimarães (2016), propuseram a diagnose via análise da camada

de 0,20-0,40 m em cultivos de grãos na agricultura de sequeiro. De toda forma, é provável que abaixo disso os aspectos pedogenéticos regulam o funcionamento do solo, a assertividade do manejo nestas camadas duplica ou mesmo triplica a probabilidade de exploração radicular em volume em relação ao manejo superficial. Esta estratégia de manejo, porém, demanda esforços, investimentos e, conseqüentemente, cautela no planejamento (Camargo *et al.*, 2024).

A correção gradual do solo em profundidade como definida neste estudo, e a partir de literaturas específicas para solos tropicais em diferentes partes do mundo (aqui, estabelecidos pelos valores de referência descritos na tabela 1), estabelece o conceito manejo do solo em perfil agrônômico como sendo a seção transversal através de todas as suas camadas incluídas na diagnose e que atesta o seu funcionamento dentro dos limites ecossistêmicos. Esta ferramenta pode constituir uma alternativa promissora para elevar a frente de enraizamento à custos compatíveis, observando respostas positivas como critério de decisão ao aprofundamento. Ademais, os indicadores e critérios aqui avaliados eventualmente podem ser modificados sem alterar a aplicabilidade do conceito de P-IQS.

4.2. Modelagem de P-IQS a partir dos IQ-atributos

A análise de regressão múltipla explicita a relação entre manejo e saúde do solo ao incorporar todos os nove IQ-atributos na equação (todos os coeficientes de regressão apresentaram significância e proporcionalidade estatística), com elevada capacidade preditiva vista por seu coeficiente de determinação (Figura 5) e mantendo o equilíbrio entre os aspectos químicos, biológicos e físicos no perfil agrônômico (Figura 4). Estes resultados atestam a instrução de Marion *et al.* (2022) de utilizar como critério de integração de indicadores a adição ponderada dos escores.

Estes resultados ressaltam o manejo integrado do solo pautado em monitoramento dos atributos e em tomadas de decisão, em contraposição àqueles que priorizam o uso de insumos e negligenciam os processos de produção associados à ciclagem (energia e matéria) e a conservação dos recursos naturais. A escolha dos IQ-atributos torna-se o ponto de principal discussão e a adoção de poucos eleva o peso dos coeficientes de ajustes na regressão e, assim, IQ-pH, IQ-P e IQ-K, bem como IQ-MOS perfil, IQ-Ca perfil e IQ-RP perfil contribuíram com aproximadamente 8% na composição de P-IQS, enquanto IQ-MOS e IQ- β glico com cerca de 12,5% e ao passo que IQ-Dsrel respondeu por 25% da variabilidade do modelo.

Chama a atenção a Ds rel possuir maior peso ponderado em relação aos demais IQ-atributos e com isso, maior influência na predição do índice medidor da saúde do solo (Figura

4). É necessária então cautela analítica, já que eventuais erros na determinação são amplificados no índice (Figura 5). No entanto, a utilização da D_s para obtenção do $IQ-D_s$ rel é coerente por se tratar de um atributo representativo do arrançamento das partículas sólidas e do espaço poroso, como já discutido, com procedimentos analíticos que apresentam acuracidade, precisão, simplicidade na execução (Borges *et al.*, 2012; Severiano *et al.*, 2013) e que expressa grandeza intensiva, cujo tamanho da amostra não representa qualquer risco aos resultados. Ademais, como já discutido, a proposição da densidade relativa com base na função de pedotransferência estabelecida por Severiano *et al.* (2021) possibilita a comparação de solos granulometricamente distintos e expressam por meio deste índice as principais funções reguladas pela estrutura do solo (compactação do solo, disponibilidade hídrica às plantas e aeração), em contraposição, os demais (química, biologia e em perfil) que por serem governados por processos independentes, também discutidos, torna-se impossibilitado a avaliação destes em um único atributo.

Assim, os escores trazem todos os aspectos à mesma magnitude de comparação e, dessa forma, a importância relativa dos IQ -atributos na composição do P-IQS torna-se independente dos pesos no modelo, uma vez que todos estão na mesma escala (valores de entrada padronizados), possibilitando a comparação direta do impacto na variável dependente. Pela figura 6, elucida-se os processos de degradação física como os de maior responsabilidade à perda da qualidade do solo, o que está atrelada à elevada suscetibilidade à compactação desta região em estudo (Severiano *et al.*, 2013) e às negligências quanto às alterações estruturais do solo pelos fazendeiros. Entre os aspectos edáficos aqui apreciados, AE-física é o único que não dispõe de ferramenta de diagnose para subsidiar ações de manejo e mitigação aos fazendeiros brasileiros (Malavolta *et al.*, 1997; Sousa e Lobato, 2004; Lopes *et al.*, 2018; Mendes *et al.*, 2019). Inevitavelmente não se gerencia o que não se mede e, dessa forma, o manejo da compactação do solo tem sido desempenhado na maioria das vezes de maneira empírica e desprovido de embasamento científico.

Em sequencia, $IQ-\beta$ glico (logo, AE-Biologia) demonstrou ser a segunda mais importante para maior saúde do solo. Isto se deve aos esforços da semeadura direta no aporte e estocagem de carbono no solo (Sá *et al.*, 2013; Bunemann *et al.*, 2018; Marion *et al.*, 2022; Simon *et al.*, 2022) e à revolução microbiológica associada ao uso de bioinsumos que a agricultura conservacionista brasileira experimenta nos últimos anos (Hungria e Mendes, 2015, Barbosa *et al.*, 2023). Em adição, os IQ -atributos relativos aos AE-Química foram os que demonstraram menores efeitos em P-IQS, em que $IQ-Ca$ perfil (0,99%) < $IQ-pH$ (3%) < $IQ-K$ (6,3%) < $IQ-P$ (8,7%). Os protocolos de avaliação da fertilidade do solo são amplamente estabelecidos na literatura (Malavolta *et al.*, 1997; Sousa e Lobato, 2004; Lopes e Guilherme,

2016) e os fazendeiros dispõem de rede de laboratórios de análise de solo capazes de atender a demanda dos fazendeiros e de ofertas de corretivos e fertilizantes, fundamentando estes resultados. Salienta-se que os impasses da fertilidade do solo encontrados neste estudo são mais associados aos aspectos econômicos em detrimento aos agrônômicos (torna-se mais barato corrigir o solo que adubá-lo, notadamente com fertilizantes fosfatados. Por este motivo, IQ-P seguido de IQ-K foram os mais restritivos porém menos limitantes que os aspectos de ordem física ou biológica). Em adição, os outros entraves podem estar associados à necessidade de refinamentos na avaliação e correção das desordens nutricionais dos solos, com enfoque nos nutrientes aqui não avaliados mas que devem ser conduzidos em associação para avaliação de P-IQS.

4.3. Diagnose da saúde do solo em pedoambientes de alta performance para a cultura da soja

IQ-atributos, AEs ou P-IQS apontam heterogeneidade entre as fazendas estudadas em reflexo a alta variabilidade das características físicas e dos atributos indicadores de qualidade do solo (Tabela 2, anexo A), bem como do manejo diferencial adotado pelos fazendeiros. Isto faz com que o nosso estudo seja representativo dos pedoambientes tropicais brasileiros e atuam como referência à outras regiões tropicais em todo o mundo. A interpretação dos resultados se torna então dependente de múltiplos critérios (a exemplo daqueles expostos na tabela 1) e sendo coerente a proposição destes índices para possibilitar a comparação de áreas numa mesma escala e atender as demandas dos diferentes usuários deste recurso (agricultores, extensionistas e cientistas).

Como o critério de classificação dos pedoambientes é qualitativo (baseado na percepção dos fazendeiros), não é possível estabelecer relações analíticas de causas e efeitos entre os escores e a performance agrônômica e, por este motivo, estes resultados foram utilizados na caracterização das áreas, na avaliação dos fatores limitantes e na discussão de valores de referência para estes índices. Com base nessas premissas, não foi possível estabelecer uma condição limítrofe de P-IQS (Figura 7A) para fazendas de alta performance ou para fatores relacionados à altitude, textura do solo, tempo de cultivo, sistema de manejo ou produtividade soja relatada pelos produtores (Anexo 1, anexo), por exemplo. Sendo assim e mesmo com escore médio do grupo “a” de fazendas apresentando valor 14 e 25% superior ao grupo “b” e “c” (0,71, 0,61 e 0,54), respectivamente, a produtividade média foi até maiores no grupo inferior (71 sacas nas fazendas de grupo “a”, 68 nas de grupo “b” e 76 sacas de soja por hectare nas de grupo “c”).

Este mesmo comportamento é observado nos aspectos edáficos. Em termos de AE-Química, e quando o manejo é assertivo, os escores de todos os IQ-atributos integrantes aumentam (é o que se observa nas fazendas de grupo “a” seguidas de “b” - Figura 7B). O equilíbrio entre os fatores químicos avaliados ressalta a correta percepção da fertilidade do solo por estes fazendeiros e, por esse motivo, espera-se que o refinamento do manejo tenha tido execução coordenada por estes e os técnicos extensionistas sendo, provavelmente, também relacionada aos demais elementos do complexo sortivo do solo, aqui não avaliados.

Por outro lado, as complexidades acerca do manejo do fósforo no solo, já discutidos, estão frequentemente associadas à perda desta qualidade, como observado nas fazendas de grupo “c”, em que IQ-pH e IQ-K ainda entregaram contribuições compatíveis às anteriores, mas com restrições associadas a este nutriente. Em adição, as fazendas do grupo “d” são as que apresentam as maiores desordens nutricionais (possui os menores escores para IQ-pH e para IQ-K e para IQ-P). Igualmente considerado, sugere-se que as limitações nutricionais além destas aqui avaliadas estejam presentes com maior frequência nestas lavouras. Por fim, e de maneira geral, estes resultados confirmam a classificação da importância dos indicadores químicos de qualidade do solo (Figura 6) ao quantificar como os mais restritivos àqueles que mais impactam o custo de produção dos cultivos.

No que diz respeito à atividade biológica do solo, a textura tem papel determinante na proteção física aos compostos orgânicos e esta, por sua vez, governa o metabolismo microbiano (Mendes *et al.*, 2019). O IQ-MOS contribuiu satisfatoriamente com AE-Biologia em todas as fazendas analisadas (as contribuições percentuais foram superiores aos escores de P-IQS, Figura 7C), ao passo que a ampla faixa de valores da enzima β -glicosidade (Tabela 2) demonstra a sensibilidade deste indicador ao manejo. Inferências genéricas associam microbiologia do solo aos conteúdos orgânicos (Balota *et al.*, 2003, Bansal *et al.*, 2022) e, estes resultados, porém, atestam que as práticas agrícolas estimularam o metabolismo microbiano nas fazendas mais bem ranqueadas (grupos “a” e “b”) mas foram fortemente inibidas nas seguintes (grupos “c” e “d”) mesmo sob condições satisfatórias do substrato heterotrófico. Esta constatação ampara-se na correlação somente moderada entre MOS e β glico, ambos a 0-0,10 m (Figura 3), quando se esperava correlação forte entre as variáveis. Embora a agricultura praticada por estes fazendeiros esteja na vanguarda tecnológica, há ainda o uso indiscriminados de insumos sintéticos (ex: agrotóxicos) altamente danosos à comunidade microbiana do solo (Defo *et al.*, 2011; Oleszczuk, *et al.*, 2014). Esta proposta estimula reflexões que ultrapassam a saúde do solo, incluindo a saúde ecossistêmica.

As contatações acerca da alta importância relativa de IQ-Ds rel no modelo de regressão múltipla (Figuras 5 e 6) são confirmadas pelo AE-física nas fazendas (Figura 7C) como a maior restrição à saúde do solo, neste estudo, e notadamente em fazendas de grupos “d”, em que cinco tiveram score nulo (Figura 7D). A agricultura brasileira tem sido embasada no uso de maquinário e implementos pesados em todas as etapas do processo produtivo e, em alguns casos, integradas com animais que levam a degradação da estrutura do solo em decorrência ao tráfego e/ou ao pisoteio (Severiano *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2021; Nascimento Júnior *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2023). Além da elevada suscetibilidade à compactação [Severiano *et al.* (2013) afirmam serem os solos mais suscetíveis do mundo] e, como já visto, muitas vezes negligenciada pelos fazendeiros, a perda de eficiência agrônômica traz consequências ainda nos processos de degradação ambiental relacionados à erosão do solo, assoreamento e eutrofização das águas de superfície.

O manejo da compactação do solo, assume então relevância fundamental na agricultura de sequeiro, principalmente pela suscetibilidade ao impedimento mecânico ao desenvolvimento radicular das plantas cultivadas e em particular na segunda safra, dada a irregularidade pluviométrica nesta época do ano (Battisti e Sentelhas, 2017, Torino *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021). A eficiência do uso água do solo remanescente após cessada a estação chuvosa quando da necessidade de fechamento de ciclo de cultivos motiva os esforços de técnicos extensionistas e fazendeiros no sentido de promover uma frente de enraizamento em profundidade por meio de técnicas supracitadas. Ampara-se, ainda, na explanação de Battisti e Sentelhas (2017) ao afirmarem que a combinação de raízes profundas com chuvas escassas pode resultar em performances agrônômicas da soja semelhantes à combinação de raízes rasas mas com chuvas abundantes, permitindo as plantas absorverem a água da chuva armazenada no perfil do solo (Mulazzani *et al.*, 2024).

Estes resultados confirmam esta constatação, em que IQ-Ca perfil não somente apresentou escores superiores aos demais IQ-atributos, em todas as fazendas (Figura 7E), como indicaram que o manejo da acidez subsuperficial é um desafio praticamente superado (Figura 6). No entanto, estes resultados reforçam a compactação como o principal desafio de manejo pela capacidade em reduzir a área radicular e torná-lo raso (Colombi *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2021), colocando em risco a eficácia da correção química. Ademais, deve-se considerar a compactação subsuperficial, que neste estudo afetou somente as fazendas de grupo “c” (Figura 7E) ocorrendo porque os solos destinados aos campos agrícolas são majoritariamente dotados de elevada uniformidade morfológica e friabilidade, resultando na ausência de adensamento natural (Severiano *et al.*, 2013).

Em adição, o manejo agropecuário deve ser um aliado à manutenção das múltiplas funções do solo. Ao constatar IQ-MOS perfil como a principal limitação ao manejo do solo em profundidade (também na figura 7E), observa-se grande oportunidade à agricultura tropical de ir além dos benefícios agronômicos da matéria orgânica do solo e desempenhar papel crucial na pegada de carbono. Freitas *et al.*, (2024) coletando amostras de solos tropicais brasileiros nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, observaram a importância da pesquisa em fazendas de plantio direto, com aumentos de 89 Mg C ha⁻¹ nos estoques de carbono do solo devido ao manejo, além das melhoras nas propriedades físico-químicas, principalmente aumento da matéria orgânica.

A análise dos escores isolados (IQ) ou integrados (AE e P-IQS) permitiram constatar que mesmo apresentando desempenho agronômico excepcional [os resultados de produtividade são superiores à média regional, nacional e dos principais países produtores de soja em todo o mundo (CONAB, 2024; USDA, 2024)] chama atenção sobre a possibilidade de elevados rendimentos mesmo em condições em que o manejo do solo não se apresenta plenamente satisfatório. Estes resultados corroboram as afirmações de Serafim *et al.* (2023) acerca da influência de fatores edáficos (qualidade do solo) e não edáficos (clima, genótipo da planta e incidência de pragas e doenças) sobre os rendimentos das culturas e as de Sentelhas e Battisti (2015), que num estudo de Yield Gap apontaram o solo como responsável por aproximadamente 25% do potencial produtivo de uma lavoura. Dessa forma, deve-se atentar para a manutenção da saúde do solo para a sustentabilidade de produção nesses pedoambientes.

Pela plenitude climática (respondendo por 50% dos fatores da produtividade, segundo os autores supracitados) e com adoção de biotecnologia genética de última geração (mais 15%, aproximadamente), os fazendeiros da região obtêm altos rendimentos mesmo que em grande parte dos casos, o manejo das lavouras (os 15% restantes) decorre de maiores inputs de insumos (notadamente corretivos e fertilizantes). Estes atuam como medidas de compensação da perda de qualidade do solo (notadamente quando associada ao AE-física) que podem proporcionar ganhos de rendimentos mesmo em condições enraizamento deficientes (Battisti e Sentelhas, 2017).

É o que foi comprovado por Santos *et al.* (2005), que estudando a compactação do solo na cultura do milho (a segunda cultura mais importante na agricultura de sequeiro brasileira e decisiva nas tomadas de decisões acerca do manejo do solo), constataram que altas doses de fósforo aplicado funciona como fator de alívio de impedimentos mecânicos às raízes e condiciona maiores produções em solos compactados. De modo semelhante, Beutler *et al.* (2004) constataram o mesmo efeito compensatório dos fertilizantes para a cultura da soja,

alinhando-se as observações de Lima *et al.* (2023) ao avaliarem aspectos físicos do solo, agronômicos e ambientais no cultivo da soja em pedoambientes corrigidos quimicamente. Estes autores observaram que a compactação do solo não comprometeu o rendimento da lavoura, embora esta possa limitar os serviços ecossistêmicos relacionados a infiltração de água e recarga hídrica subterrânea (Severiano *et al.*, 2011). Em adição, as restrições de produtividade impostas por aspectos físicos do solo são também minimizados em anos agrícolas com boa disponibilidade de chuvas, mas intensificados sob veranicos (Moura *et al.*, 2019).

Foi necessário, no entanto, muitos esforços dos cientistas na identificação das potencialidades e limitações dos solos tropicais altamente intemperizados (Severiano *et al.*, 2013; Lopes e Guilherme, 2016; Mendes *et al.*, 2019) e dos fazendeiros na melhoria da fertilidade, uma vez que são pedoambientes naturalmente limitados, mas que quando corrigidos quimicamente contribuem significativamente para a produção agropecuária do país e para segurança alimentar global. Constatou-se que condições de baixos escores de P-IQS ($< 0,59$) e alta performance (Figura 7; anexo 1) atuam como o ponto de partida do manejo, mas demonstra a necessidade de melhoria da qualidade do solo em todos os IQ-atributos avaliados.

Este diagnóstico predispõe o desenvolvimento de uma agricultura de produtos e a vulnerabilidade mercadológica (dependência de insumos, em destaque, aos importados) e que compromete a rentabilidade de atividade (saúde financeira do agronegócio). A busca por resiliência edáfica por meio da manutenção da capacidade produtiva em associação às múltiplas funções do solo somente pode ser atingida em solos equilibrados e o P-IQS atua como ferramenta de monitoramento global das desordens de manejo, subsidiando o desempenho da agricultura de processos com vista à obtenção de maiores escores juntamente com as altas performances. Dessa forma, torna-se possível a obtenção de pedoambientes saudáveis, resilientes e de maior rentabilidade pela maior produtividade e com a redução de custos de produção associadas à preservação ambiental.

5. Conclusão

Nesta pesquisa, constatou-se que a saúde do solo em pedoambientes de alta performance da cultura da soja no Cerrado brasileiro vai além da camada superficial, sendo regulada por processos edáficos independentes e interligados pelo componente vegetal. Avaliar o manejo do solo em camadas distintas e integrá-las em um índice foi um desafio mensurado por P-IQS, promissora ferramenta de identificação de desordens de manejo e do perfil

agronômico do solo. Os nove indicadores avaliados foram precisos na predição do parâmetro e representam os principais entraves enfrentados pelos fazendeiros relacionados à acidez do solo (tanto a trocável de superfície quanto a potencial no subsolo), à disponibilidade de nutrientes (Ca, P e K), ao estoque de carbono como regulador da atividade microbiana (mediado por atividades enzimáticas) e condicionador agrônomo e ambiental, à estrutura (densidade relativa) e à compactação do solo (resistência à penetração em profundidade). Estes aspectos estão relacionados aos pedoambientes estudados, mas eventualmente outros atributos podem ser considerados sem alterar a aplicabilidade do conceito proposto. Os nossos resultados apontam alta variabilidade em todos os índices avaliados (IQ-atributos, AEs e P-IQS) dada a heterogeneidade natural e representatividade dos solos em interação às práticas adotadas; os problemas de ordem física geralmente associados à compactação do solo são as maiores limitações agrônômicas e que também comprometem a sustentabilidade agropecuária das fazendas. Por outro lado, a matéria orgânica do solo está majoritariamente associada às camadas superficiais, sendo oportuna e necessária a estocagem ao longo do perfil visando o beneficiamento dos processos agroambientais relacionados à retenção de água e de nutrientes e mitigação da pegada de carbono. Os aspectos edáficos de ordem química expressam as tecnologias disponíveis e os esforços dos fazendeiros na avaliação e correção da fertilidade do solo, cujas maiores restrições foram associadas aos elementos que mais impactam o custo de produção dos cultivos.

6. Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ARAGÓN, A.; GARCIA, M. G.; FILGUEIRA, R. R.; PACHEPSKY, Y. A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: The relationship with organic carbon and water content. **Soil and Tillage Research**, v. 56, n. 3, p. 197-204, 2000.

BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. **Biology and Fertility of Soils**, v. 38, n. 1, p. 15–20, 2003.

BANSAL, S.; CHAKRABORTY, P.; KUMAR, S. Crop – livestock integration enhanced soil aggregate - associated carbon and nitrogen , and phospholipid fatty acid. **Scientific Reports**, p. 1–13, 2022.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of Soybean Resilience to Drought through Deep Root System in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1612-1622, 2017.

BARBOSA, J. Z., POGGERE, G., CORRÊA, R. S., HUNGRIA, M., MENDES, I. DE C. Soil enzymatic activity in Brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. **Applied Soil Ecology**, v. 190, p. 105014, 2023.

BARROS, E.; CURMI, P.; HALLAIRE, V.; CHAUVEL, A.; LAVELLE, P. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an Oxisol in the process of forest to pasture conversion. **Geoderma**, v.100, p.193-213, 2001.

BARTZ, M.L.C.; PASINI, A.; BROWN, G.G. Earthworms as soil quality indicators in Brazilian no-tillage systems. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 39-48, 2013.

BLANCHART, E.; LAVELLE, P.; BRAUDEAU, E.; LE BISSONNAIS, Y.; VALENTIN, C. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. **Soil Biology Biochemistry**, v.29, p.431-439, 1997.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agrícola** (USP. Impresso), Piracicaba, v. 61, n.6, p. 626-631, 2004.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986a. p. 377-382. (Agronomy monograph, 9).

BONETTI, J. de A.; NUNES, M. R.; FINK, J. R.; TRETTO, T.; TORMENA, C. A. Agricultural practices to improve near-surface soil health and crop yield in subtropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 234, n. December 2022, p. 1–10, 2023.

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 123, p. 43-49, 2012.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

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

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, p.57-64, 2008.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275–286, 2003.

CAIRES, E. F.; DUART, V. M.; RODRIGUES, G. L. A.; BINI, A. R. Crop nutrition and grain yield as affected by phosphorus fertilization and continued use of phosphogypsum in an Oxisol under no-till management. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, p. 2370–2385, 2022.

CAMARGO, F. A. O.; SILVA, L. S.; MERTEN, G. H.; CARLOS, F. S.; BAVEYE, P. C.; TRIPLETT, E.W. Brazilian agriculture in perspective: Great expectations vs reality. **Advances in Agronomy**, pp. 53 – 114, 2017.

CHANG, T.; FENG, G.; PAUL, V.; ADELI, A.; BROOKS, J. P.; JENKINS, J. N. Soil health assessment for different tillage and cropping systems to determine sustainable management practices in a humid region. **Soil and Tillage Research**, v. 233, n. June 2022, p. 105796, 2023.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. **PLOS ONE**, v. 11, n. 3, p. 1–26, 2016.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0160148, 2017.

CORRECHEL, V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Influence of position relative to the crop row on bulk density in two tillage systems. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 23, p. 165-173, 1999.

COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1026–1035, 2018.

Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2021/2022. Décimo segundo levantamento. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos?start=20>>. Acesso em: 5 out. 2024.

COOK, R. L.; ANDREW, T. Tillage and Fertilizer Effects on Crop Yield and Soil Properties over 45 Years in Southern Illinois. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 415-426, 2016.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Phosphorus adsorption in ten soils from Pernambuco State and its relations with physical and chemical parameters. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, p. 153 – 159, 2011.

COSTA, C. H. M. DA; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean-oat-sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119–132, 2016.

CRUZ, J. C.; SILVA, G. H. DA; PEREIRA FILHO, I. A.; GONTIJO NETO, M. M.; MAGALHÃES, P. C. Sistema de produção de milho Safrinha de alta produtividade: Safra 2008 e 2009. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2011. 10p. Circular técnica 160

DE CAMARGO, T. A.; ALVES, L. A.; MENDES, I. C.; GASQUES, L. R.; DE OLIVEIRA, L. G. S.; PIRES, G. C.; ALMEIDA, T. O.; CARVALHO, P. C. DE F.; DE SOUZA, E. D. Enhancing soil quality and grain yields through fertilization strategies in integrated crop-livestock system under no-till in Brazilian Cerrado. **European Journal of Soil Biology**, v. 121, p. 103613, 2024.

DEFO, M.A.; NJINE, T.; NOLA, M.; E BEBOUA, F. S. Microcosm study of the long term effect of endosulfan on enzyme and microbial activities on two agricultural soils of Yaounde-Cameroon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, p.2039-2050, 2011.

LUZ, F. B. da; da SILVA, V. R.; MALLMANN, F. J. K.; PIRES, C. A. B.; DEBIASI, H.; Franchini, J. C.; Cherubin, M. R. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 281, n. May, p. 100–110, 2019.

OLIVEIRA, L. E. Z. de; NUNES, R.de S.; de FIGUEIREDO, C. C.; REIN, T. A. Spatial distribution of soil phosphorus fractions in a clayey Oxisol submitted to long-term phosphate fertilization strategies. **Geoderma**, v. 418, 2022.

DIAS JÚNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, n. 2, p. 337-346, 2000.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The statistic division – FAOSTAT. Paris: FAO, 2022. Disponível em: Acesso em: 26 agosto. 2024.

FERNÁNDEZ, F. G.; SCHAEFER, D. Assessment of Soil Phosphorus and Potassium following Real Time Kinematic-Guided Broadcast and Deep-Band Placement in Strip-Till and No-Till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p.1090-1099, 2012.

FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. G. da .; TORMENA, C. A.; SEVERIANO, E. da C., TAVARES, R. L. M.; BRAZ, G. B. P.; PAIVA FILHO, SV de. Physiological and agronomic response of soybean cultivars to soil compaction in the Brazilian Cerrado. **Bragantia** , v. 82, p. 20220160, 2023.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAYER, C.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 36, p. 379 - 387, 2014.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 95–106, 2002.

FREITAS, V. S.; BABOS, D. V.; GUEDES, W. N.; SILVA, F. P.; TOZO, M. L. DE L.; ANDRADE, C. A.; VILLAS-BOAS, P. R.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L. Soil organic matter dynamics and soil carbon stocks from tropical and sub-tropical areas under no-till: An on-farm research. **Catena**, v. 247, n. October, 2024.

GLIESSMAN, S.R. Agroecologia: Processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 653p.

HANSEL, F. D. Fertilizantes fosfatados solúveis e modo de aplicação na cultura da soja. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, v.12, p.23-32, 2019.

HUANG, Y., TAO, B., YANG, Y., ZHU, X., YANG, X., GROVE, JH E REN, W. Simulação de efeitos de plantio direto no rendimento das culturas e emissões de gases de efeito estufa em sistemas de cultivo de milho e soja em Kentucky: 1980–2018. **Agricultural Systems**, v. 197, p.103355, 2022.

JACOBS, A. A.; EVANS, R. S.; ALLISON, J. K.; GARNER, E. R.; KINGERY, W. L.; MCCULLEY, R. L. Cover crops and no-tillage reduce crop production costs and soil loss, compensating for lack of short-term soil quality improvement in a maize and soybean production system. **Soil and Tillage Research**, v. 218, p.105310, 2022.

KANG, L., YUE, S., LI, S. Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. **Journal of Integrative Agriculture** v. 13, n. 9, p 2028–2039, 2014.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994. p.37-51. (Special, 35)

LIMA, A. Y. V.; CHERUBIN, M. R.; da SILVA, D. F.; MOTA, J. C. A.; SILVA, F. G. M.; de ARAUJO, A. S. F.; MELO, V. M. M.; VERMA, J. P.; PEREIRA, A. P. DE A. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process. **Applied Soil Ecology**, v. 193, n. May 2023, 2024.

LOPES, A. S.; GUILHERME GUIMARÃES, L. R. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Physical attributes related to soil compaction under native vegetation of Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319p.

MANCUSO, M.A.C.; SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; CASTRO, G.S.A. Efeito de fontes e doses de potássio na produtividade, nutrição e exportação de macronutrientes do café arábica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1448-1456, set. 2014.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determination of relative soil density through a pedotransfer function of maximum bulk density. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.

MARINARI, S.; MANCINELLI, R.; CAMPIGLIA, E.; GREGO, S. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. **Ecological Indicators**, v. 6, p.701-711, 2006.

MARION, L. F.; SCHNEIDER, R.; CHERUBIN, M. R.; COLARES, G. S.; WIESEL, P.G.; da COSTA, A. B.; LOBO, E. A. Development of a soil quality index to evaluate agricultural

cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 218, n. August 2021, p. 105293, 2022.

MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian cerrado soils. **Geoderma**, v. 119, p. 179-195, 2004.

MATHEW, I.; SHIMELIS, H.; MUTEMA, M.; CHAPLOT, V. What crop type for atmospheric carbon sequestration: Results from a global data analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 243, n. February, p. 34–46, 2017.

MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil. 1. ed. Madison - Estados Unidos: ACSESS, 2024. v. 1. 432p

MENDES, I.C; SOUSA, D.M.G.; REIS JUNIOR, F.B.; LOPES, A.A.C.; SOUZA, L.M. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. In: SEVERIANO, E.C.; MORAES, M.F.; PAULA, A.M. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo** - Volume X. 1ed.Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019, p. 399-462.

MORAES, A. L. M. Desenvolvimentos da política agrícola do Brasil. **Revista Política Agrícola**, v. 23, p. 55 – 64, 2014.

MOURA, M. S.; SILVA, B. M.; MOTA, P. K.; BORGHI, E.; DE RESENDE, A. V.; ACUÑA-GUZMAN, S. F.; CURI, N. 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**, v. 243, p. 106523, 2021

MULAZZANI, R. P., BOENO, D., RIBEIRO, B. S. M. R., ALVES, A. F., ZANON, A. J., GUBIANI, P. I. Geoderma Regional Chemical constraints are the major limiting factor of root deepening in southern Brazil soils. **Geoderma Regional**, v. 38, p. e00825, 2024.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em Solo e Planta em Condições Tropicais Editora UFV, Viçosa v 399 ,1999.

NUNES, M. R.; KARLEN, DOUGLAS. L.; VEUM, K. S.; MOORMAN, T. B. A SMAF assessment of U.S. tillage and crop management strategies. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 8, n. June, 2020.

OLESZCZUK, P.; JOŚKO, I.; FUTA, B.; PASIECZNA-PATKOWSKA, S.; PAŁYS, EDWARD.; KRASKA, P. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil. **Geoderma**, v. 214–215, p. 10-18, 2014.

PIRAS, S.; WESZ, V. J.; GHINOI, S. Expansão da soja, meio ambiente e desenvolvimento humano: uma análise entre municípios brasileiros. **Sustentar**, v.13, p. 1 - 20, 2021.

PIVOTO, R.; BOENO, D.; SAN, B.; ROLIM, M.; FERIGOLO, A.; JUNIOR, A.; IVONIR, P. Chemical constraints are the major limiting factor of root deepening in southern Brazil soils. **Geoderma Regional**, v. 38, n. June, p. e00825, 2024.

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. The rotten apples of Brazil's agribusiness. **Science**, v. 369, p. 246-248, 2020.

RUIZ, F.; CHERUBIN, M. R.; FERREIRA, T. O. Soil quality assessment of constructed Technosols: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, v. 276, 2020.

SÁ, J.C.M.; SANTOS, J. B.; LAL, R.; MORAES, A.; TIVET, F.; SÁ, M.F.M.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A.O.; EURICH, G.; FARIAS, A.; FRIEDRICH, T. Soil specific inventories of landscape carbon and nitrogen stocks under no-till and native vegetation to estimate carbon offset in a subtropical ecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 2094-110, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.01.0007>.

SANTOS, G. A., DIAS JUNIOR, M. de S., GUIMARÃES, P. T. G., FURTINI NETO, A. E. Different compaction degrees and phosphorus supply influencing the corn plants growth (*Zea mays* L.) cultivated in different soils. . **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p. 740–752, 2005.

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

SENTELHAS, P.C., BATTISTI, R., CAMARA, G.M.S., FARIAS, J.R.B., HAMPF, A.C., NENDEL, C., The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v.153, p.1394–1411, 2015.

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. Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till Systems in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 862, n. December 2022, 2023.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 773-782, 2011.

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. Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality. **Soil & Tillage Research**, v. 208, p. 104873, 2021.

SILVA, J.A.G.; COSTA, K.A.P.; SEVERIANO, E.C.; SILVA, A.G.; VILELA, L.; LEANDRO, W.M.; MUNIZ, M.P.; SILVA, L.M.; MENDONCA, K.T.M.; BARROS, V.M. Efficiency of desiccation, decomposition and release of nutrients in the biomass of forage plants of the genus after intercropping with sorghum in integrated systems for soybean productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 1-19, 2024

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, É. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. B. B.; CURI, N. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 36-43, 2019.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103-113, 2015.

SIMON, C. da P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B. de.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 46, p. 1–21, 2022.

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

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICAN. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: <www.soils.org/publications/soils-glossary>. Acesso em: 12 fev. 2025.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

STOLF, R.; FAGANELLO, B.F. Utilização do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar-Stolf, na recomendação do preparo do solo na Usina Nossa Senhora Aparecida (Pontal-SP). STAB, 1:11-22, 1983. (Reeditado: Piracicaba, IAA/Planalsucar, 1984. 14p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim, 3)).

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: Weaver, R.W. et al. (Eds.) **Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties**. SSSA Book Ser 5. SSSA, Madison, pp. 778-833, 1994.

TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. **Manual of soil method analysis**. 3.ed. Rio de Janeiro. 2017. 573p.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature**, v. 466, p. 554-556, 2010.

TORINO, A. B.; do NASCIMENTO JÚNIOR, L. F.; de BRITO, M. F.; LIMA, J. D. P.; GONÇALVES, W. G.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C. Agronomic performance of

maize and Brachiaria grasses cultivated at monocropping and intercropping in a compacted Latossolo. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 9, p. 1533–1540, 2020.

United States Department of Agriculture. Production, Supply and Distribution. Safra 2021/2022. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>>. Acesso em: 5 out. 2024.

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; JOHNSON, J. M. F. Simultaneous determination of β -glucosidase, β -glucosaminidase, acid phosphomonoesterase, and arylsulfatase activities in a soil sample for a biogeochemical cycling index. *Applied Soil Ecology*, v. 142, p. 72-80, 2019.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.

VIZCAYNO-SOTO, G.; COTE, B. 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**, v. 35, p. 2965-2985, 2004.

WINKLER, K.; FUCHS, R.; ROUNSEVELL, M.; HEROLD, M. Global land use changes are four times greater than previously estimated. **Nature Communications**, v.12, p. 2501, 2021.

ZHU, M.; AI, X.; SHENG, M.; AI, S.; MIAO, N.; AI, Y. Using a soil quality index to evaluate the artificial soil quality response to rehabilitation time. **Ecological Engineering**, v. 202, p. 107234, 2024.

Anexo A

Figura A. Fotografias dos procedimentos de amostragens.

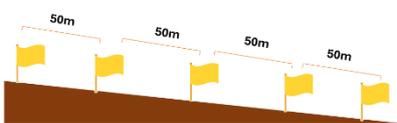


Tabela A. Locais de amostragem e breves descrições de lavouras do sudoeste do estado de Goiás, na safra 2021/2022.

Area	Município	Latitude	Longitude	Altitude	Textura	Tempo de cultivo	Sistema de manejo	Produtividade da soja
1	São João da Paraúna	-16°45'28.07"	-50°21'59.16"	664 m	Argilo arenoso	5 anos	Plantio Direto	64±2,6
1	Paraúna	-16°58'46.25"	- 50°25'35.48"	675 m	Areia franca	20 anos	Plantio Direto	64±2,7
3	Caiapônia	-16°45'32.07"	-51°43'49.55"	669 m	Franco argiloso	10 anos	Plantio Direto	74 ±0,8
4	Caiapônia	-17°16'35.06"	-51°40'50.47"	1005 m	Argila	40 anos	Plantio Direto	74 ±1,2
5	Indiara	-17° 4'44.54"	-50° 0'20.73"	541 m	Argilo arenosa	30 anos	Lavoura Irrigada	69±1,3
6	Indiara	-17° 5'40.06"	-49°58'50.57"	536 m	Franco argiloso arenoso	30 anos	Lavoura Irrigada	69±1,3
7	Acreúna	-17°13'39.87"	-50°23'48.51"	653 m	Argilo siltosa	30 anos	Plantio Direto	78
8	Acreúna	- 17°13'51.05"	-50°23'19.57"	677 m	Argilo siltosa	30 anos	Lavoura Irrigada	85
9	Montividiu	-17°16'4.60"	-51°14'23.32"	894 m	Muito argilosa	36 anos	Plantio Direto	70±0,4
10	Montividiu	-17°18'25.17"	-51°21'40.57"	881 m	Argila	22 anos	Plantio Direto	72±2,6
11	Montividiu	-17°20'8.59"	-51°28'56.73"	934 m	Franco arenoso	40 anos	Integração Lavoura-Pecuária	81±2,2
12	Montividiu	-17°21'45.41"	- 51°29'24.03"	964 m	Muito argilosa	40 anos	Integração Lavoura-Pecuária	81±1,9
13	Montividiu	-17°23'0.91"	-51°25'48.38"	951 m	Muito argilosa	30 anos	Integração Lavoura-Pecuária	68
14	Montividiu	- 17°24'50.53"	-51°25'35.75"	897 m	Argila	30 anos	Lavoura Irrigada	75
15	Montividiu	-17°27'54.91"	-51°24'12.07"	928 m	Argila	37 anos	Plantio Direto	65±0,4
16	Montividiu	-17°30'1.92"	-51°17'3.19"	903 m	Argila	33 anos	Plantio Direto	65±2,3
17	Montividiu	-17°30'3.88"	-51°16'27.91"	903 m	Argila	33 anos	Plantio Direto	68±1,7
18	Montividiu	-17°30'30.56"	-51°29'53.25"	930 m	Muito argilosa	37 anos	Plantio Direto	59±1
19	Montividiu	-17°30'39.98"	-51°12'21.87"	899 m	Muito argilosa	25 anos	Plantio Direto	87±2,7
20	Montividiu	-17°31'4.85"	-51°12'8.02"	908 m	Muito argilosa	15 anos	Plantio Direto	80±3,6
21	Montividiu	-17°33'55.28"	-51°16'20.99"	897 m	Muito argilosa	20 anos	Plantio Direto	66±3,7

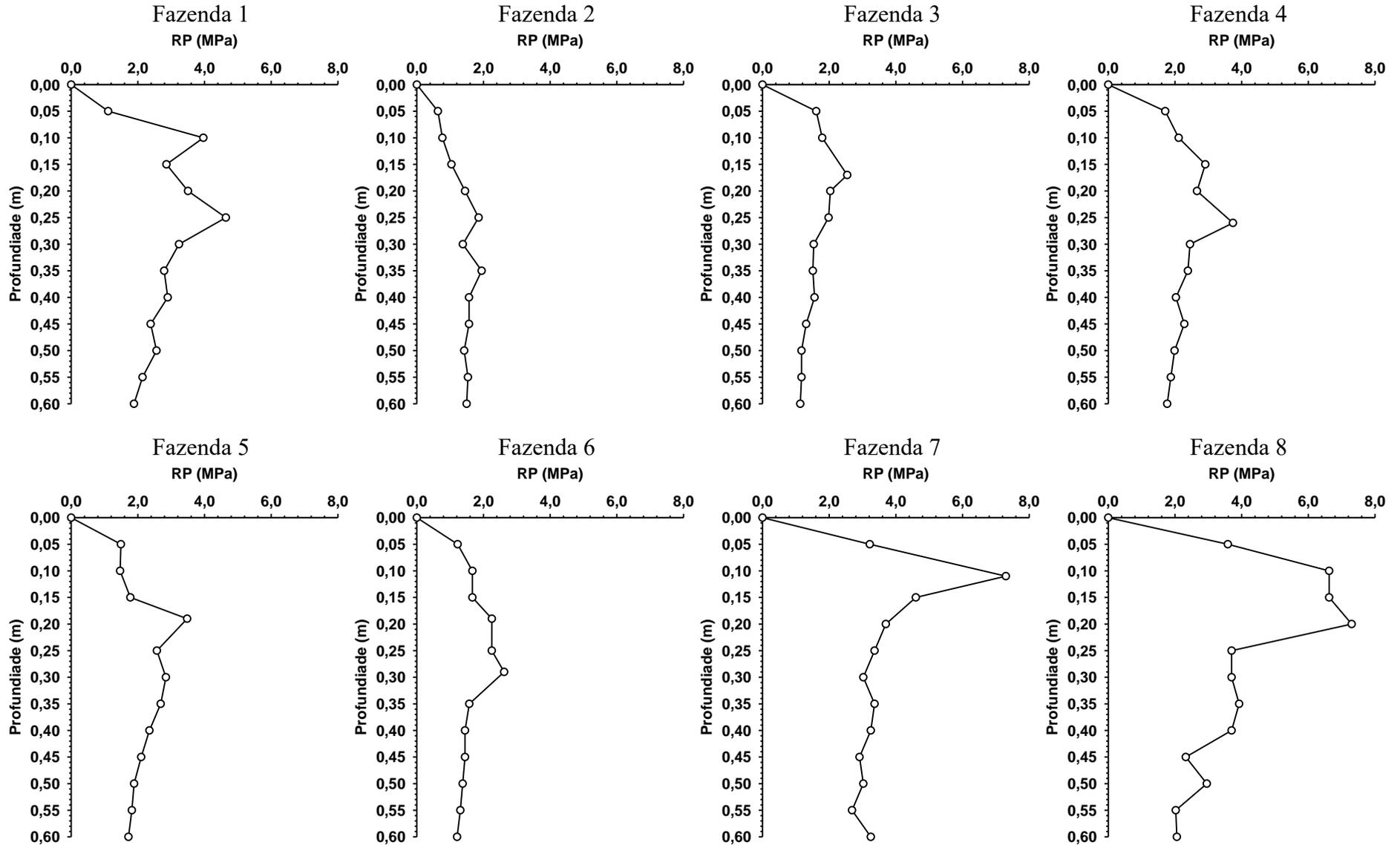
continua...

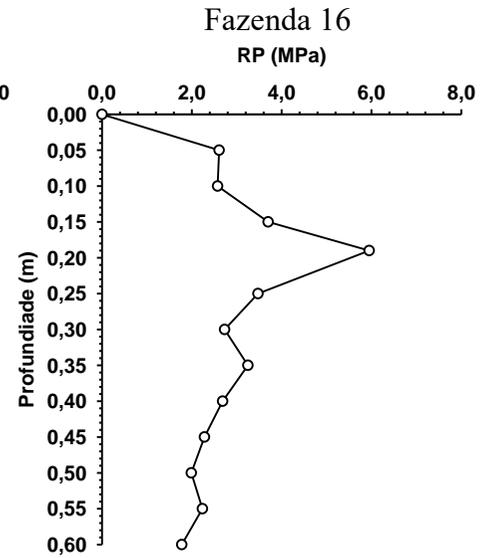
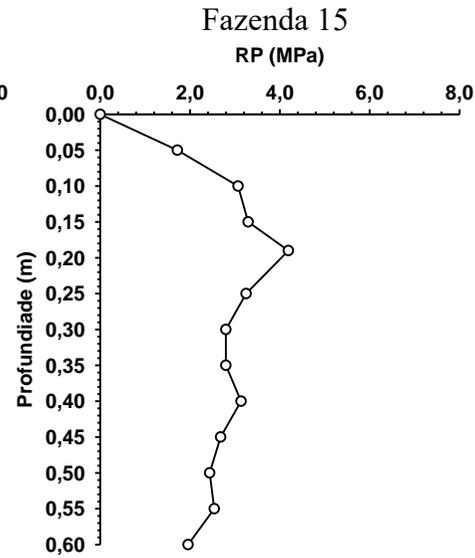
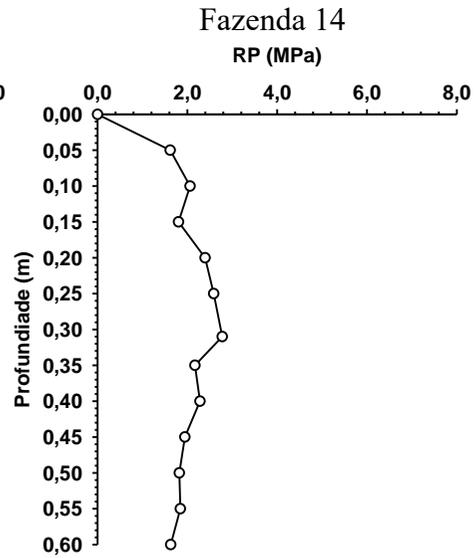
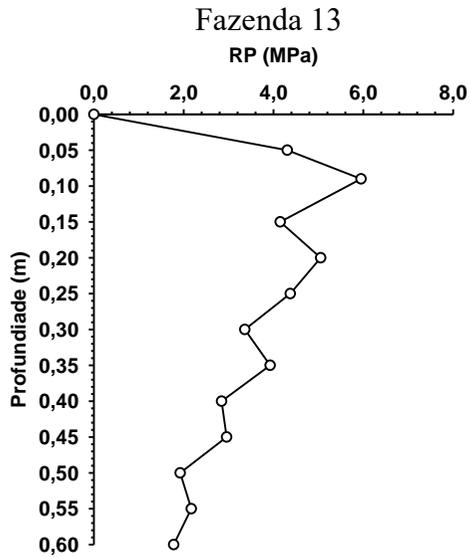
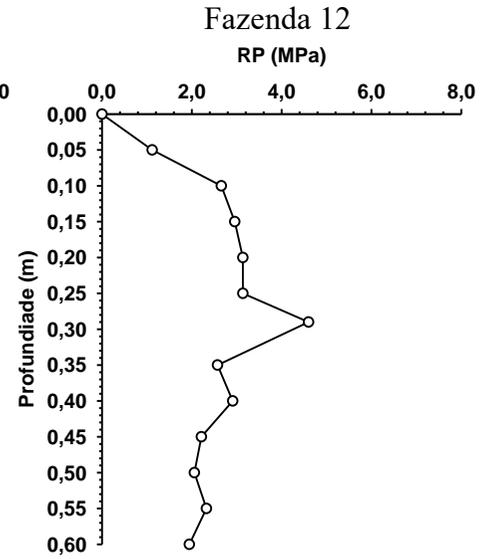
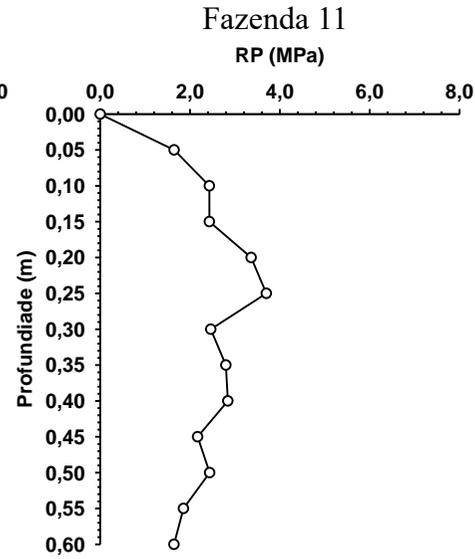
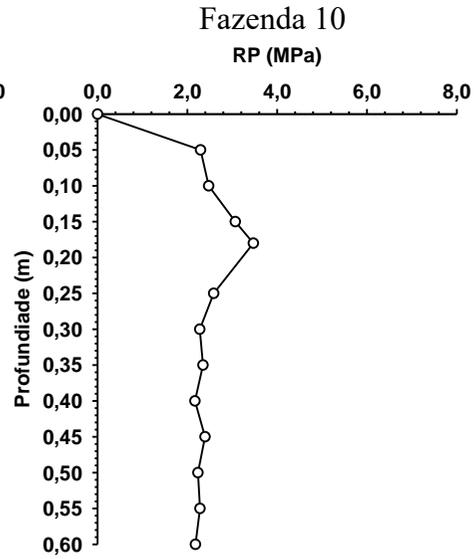
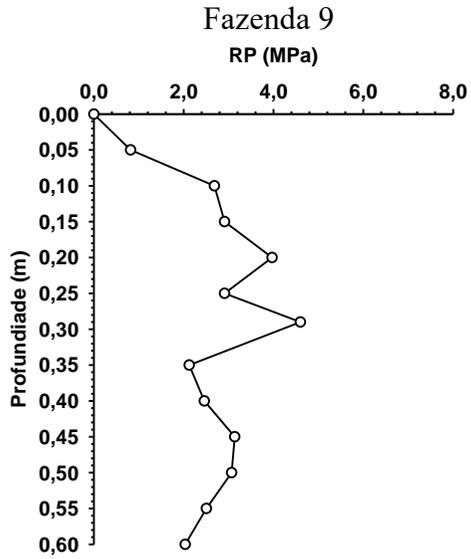
... continua

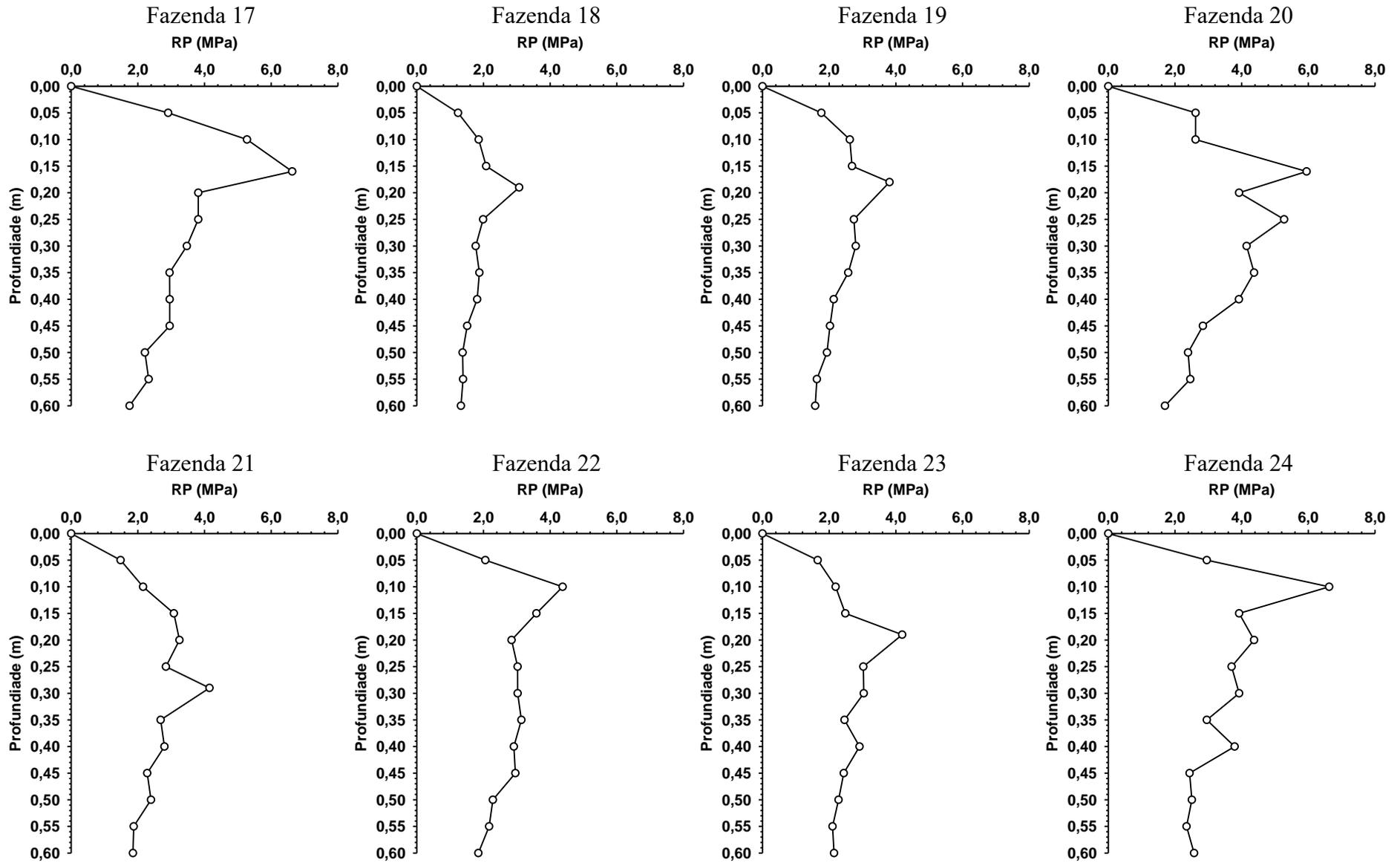
22	Joviânia	-17°53'16.63"	-49°47'42.95"	656 m	Franco argilo siltosa	50 anos	Lavoura Irrigada	101±2,4
23	Mineiros	-17°54'3.68"	-53° 4'51.26"	853 m	Franco arenosa	18 anos	Integração Lavoura-Pecuária	70±1,4
24	Mineiros	-17°50'48.59"	-53° 0'56.90"	892 m	Muito argilosa	6 anos	Plantio Direto	85±2,4
25	Pontalina	-17°28'19.81"	-49°22'4.87"	661 m	Argila	10 anos	Integração Lavoura-Pecuária	68±1,9
26	Rio Verde	-17°25'1.91"	-51°38'11.91"	986 m	Argila	30 anos	Plantio Direto	75±3,7
27	Rio Verde	-17°28'21.84"	-51°27'33.86"	918 m	Muito argilosa	20 anos	Plantio Direto	65±3,7
28	Rio Verde	-17°30'25.67"	-51°34'37.31"	964 m	Franco arenoso	30 anos	Plantio Direto	62
29	Rio Verde	-17°30'34.05"	-51°38'18.21"	926 m	Muito argilosa	30 anos	Plantio Direto	68
30	Rio Verde	-17°40'30.48"	-50°49'9.83"	720 m	Argila	35 anos	Plantio Direto	69±1,6
31	Rio Verde	-17°49'17.56"	-50°56'38.74"	745 m	Argila	25 anos	Plantio Direto	66±0,4
32	Rio Verde	-17°49'18.99"	-51°11'58.96"	866 m	Muito argilosa	30 anos	Plantio Direto	57±2
33	Rio Verde	-17°51'34.23"	-51° 5'38.33"	800 m	Franco arenoso	15 anos	Plantio Direto	62±2
34	Rio Verde	-17°56'55.28"	-50°58'49.71"	719 m	Franco argiloso arenoso	20 anos	Plantio Direto	64±2,1
35	Rio Verde	-18° 4'5.53"	-50°47'12.64"	867 m	Argila	15 anos	Lavoura Irrigada	64±1,1
36	Rio Verde	-18° 4'15.05"	-50°47'14.87"	867 m	Argila	15 anos	Plantio Direto	64±1,1
37	Rio Verde	-18° 4'18.50"	-50°51'16.22"	854 m	Argila	2 anos	Plantio Direto	65±1,2
38	Jataí	-17°49'59.96"	-51°30'10.12"	852 m	Argila	30 anos	Plantio Direto	72±1,8
39	Jataí	-17°58'57.97"	-51°50'28.42"	812 m	Argila	10 anos	Integração Lavoura-Pecuária	100
40	Jataí	-18° 7'11.62"	-51°46'20.28"	766 m	Franco argiloso arenoso	20 anos	Plantio Direto	65±1,5

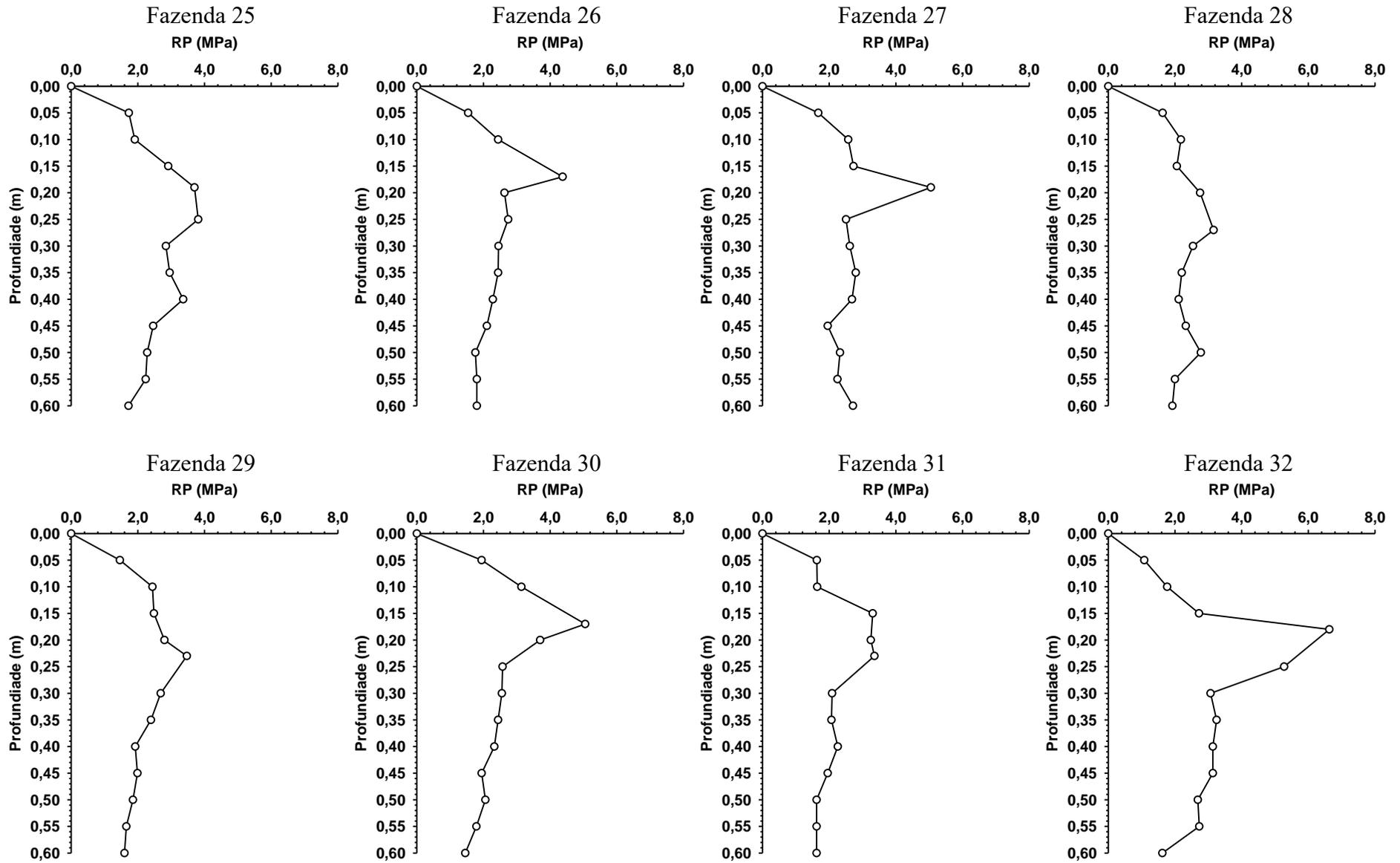
¹: Média das safras 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022.

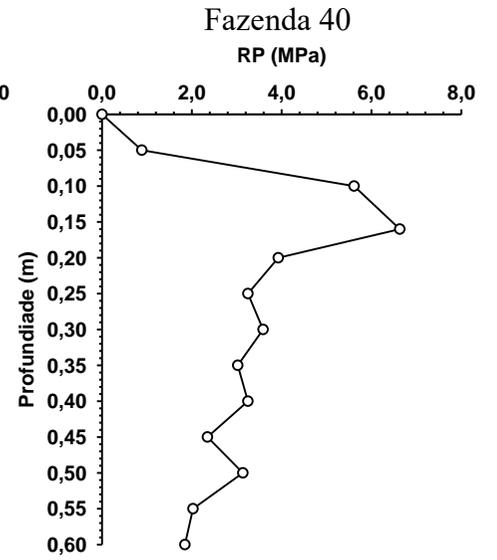
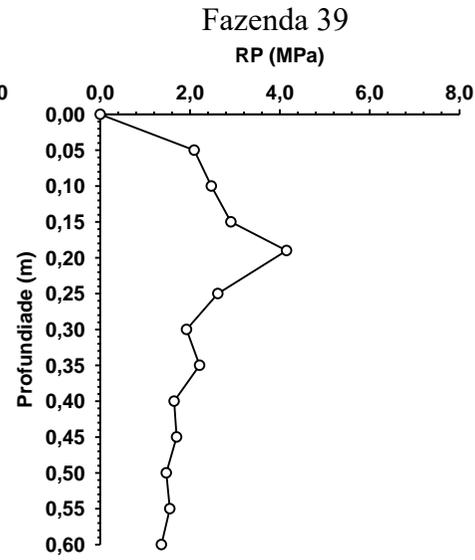
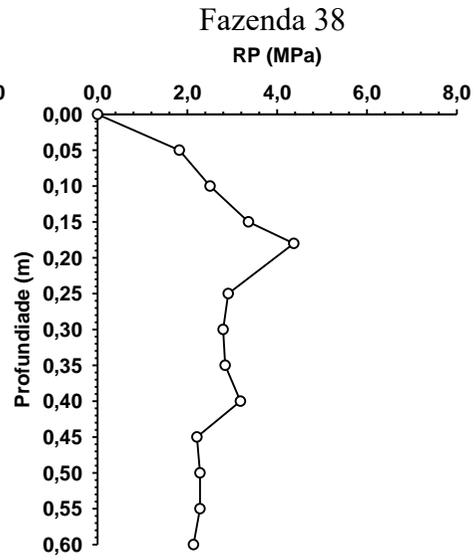
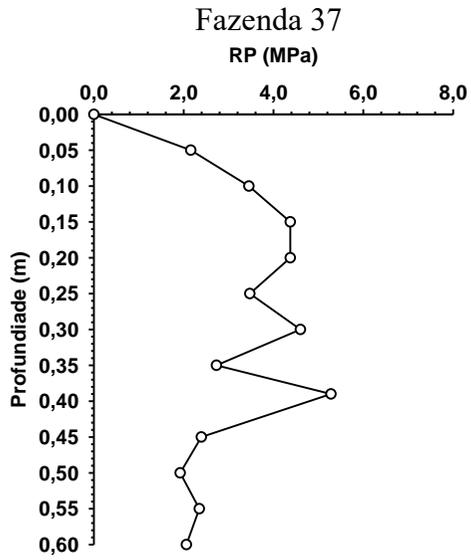
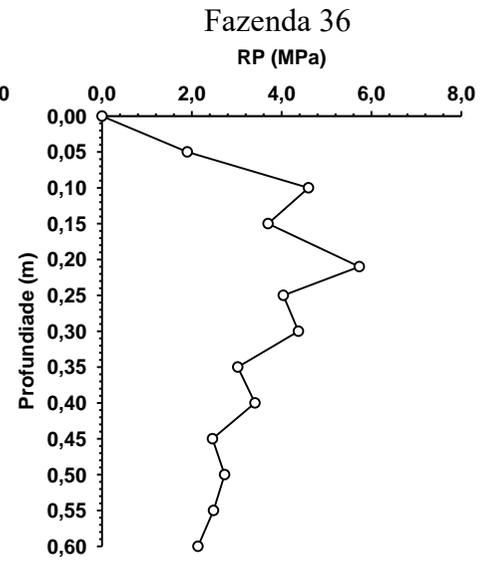
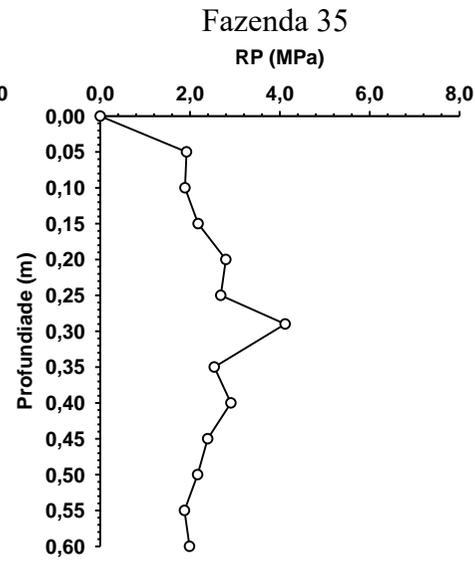
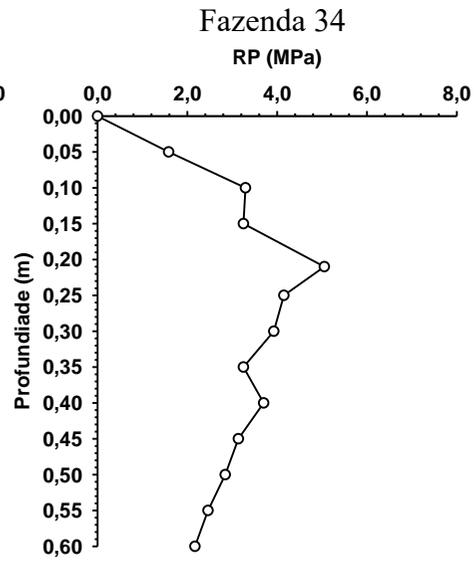
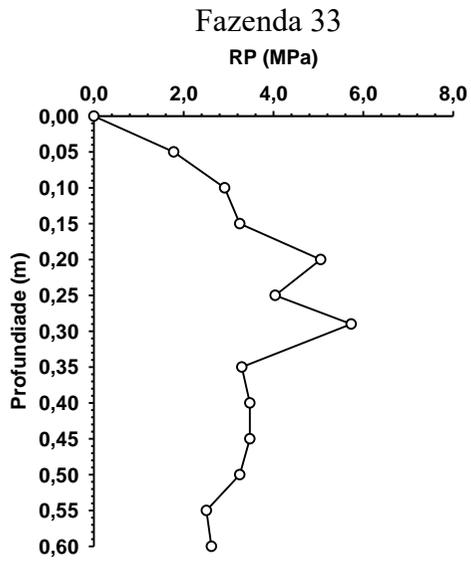
Figura B. Resistência do solo à penetração (RP, MPa) em fazendas com pedoambientes de alta performance da cultura da soja no estado de Goiás, Brasil.











CAPÍTULO 2

Diagnose da compactação do solo em pedoambientes agropecuários no Cerrado brasileiro

RESUMO: O Brasil é considerado a fazenda global pela contribuição na segurança alimentar no mundo e pelo desempenho agrônomo alcançando a excelência em diversas culturas. Esta atividade é potencializada por sol, água e terra abundantes no domínio morfoclimático do Cerrado, mas igualmente comprometida por uma verdade inconveniente, a altíssima suscetibilidade dos solos à compactação numa agricultura altamente mecanizada, tornando um problema praticamente inevitável. No entanto, a literatura carece de esforços coordenados na definição dos atributos diagnósticos e na interpretação de valores de referência baseados em condições estruturais condicionantes à manutenção dos serviços ecossistêmicos que os solos oferecem. Com esta pesquisa objetivou-se avaliar o impacto agrícola nos indicadores de qualidade física do solo em fazendas do Cerrado brasileiro com vistas à proposição de uma ferramenta de diagnose da compactação do solo. Para tanto, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m e 0,20-0,30 m em 45 propriedades localizadas no sudoeste do estado de Goiás, Brasil, que foram distribuídas em três grupos, conforme a performance da cultura da soja em até sete safras (mais produtivas, produtividade intermediária e menos produtivas). Os solos foram analisados para caracterização e para obtenção de 12 propriedades de quatro naturezas físicas: qualidade das frações sólida, de capacidade, de intensidade e de resistência mecânica. A qualidade física dos solos estudados foi fortemente influenciada pela distribuição textural, sendo necessário isolar o efeito dos impactos do uso e manejo da composição do solo, e foi possível pela determinação da densidade relativa e pela robustez da macroporosidade do solo, bem como pela correlação entre estes atributos. Assim, foi possível validar funções de pedotransferência necessitando, para isso, estabelecer uma condição de contorno relacionada à deficiência analítica de dispersão de solos muito argilosos e muito intemperizados, nestes o pseudossilte era presente e desempenhou comportamento funcional na modelagem da compactação do solo. Pelos critérios de julgamento testados foi possível diagnosticar a ocorrência da compactação com 99% de acuracidade, presente em todos os pedoambientes e em todos os sistemas de manejo avaliados, com maior ocorrência em camadas

imediatamente abaixo da superfície. Se os solos de textura arenosa e média isto não é um problema, nos argilosos e particularmente muito argilosos é uma realidade que demanda esforços pelos fazendeiros para a sua mitigação.

Palavras-chave: Física de solos tropicais, densidade relativa; grau de compactação; macroporosidade do solo; plantio direto; pseudossilte.

Diagnosis of soil compaction in agricultural pedoenvironments in the Brazilian Cerrado

ABSTRACT: Brazil is considered the global farm due to its contribution to food security worldwide and its agronomic performance, achieving excellence in several crops. This activity is enhanced by abundant sun, water and land in the morphoclimatic domain of the Cerrado, but it is also compromised by an inconvenient truth: the extremely high susceptibility of soils to compaction in highly mechanized agriculture, making this a practically inevitable problem. However, literature lacks coordinated efforts in defining diagnostic attributes and interpreting reference values based on structural conditions that are conditioned to the maintenance of ecosystem services that soils provide. This research aimed to evaluate the agricultural impact on soil physical quality indicators on farms in the Brazilian Cerrado, with a view to proposing a tool for diagnosing soil compaction. To this end, soil samples were collected from the 0-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.30 m layers in 45 properties located in the southwest of the state of Goiás, Brazil, and distributed into three groups according to the performance of the soybean crop in up to seven harvests (most productive, intermediate productivity and least productive). The soils were analyzed for characterization and to obtain 12 properties of four physical natures: quality of the solid fractions, capacity, intensity and mechanical resistance. The physical quality of the studied soils was strongly influenced by the textural distribution, making it necessary to isolate the impacts of the use and management of the soil composition, which was possible by determining the relative density and the robustness of the soil macroporosity, as well as by the correlation between these attributes. Thus, it was possible to validate pedotransfer functions, requiring, for this purpose, to establish a boundary condition related to the analytical deficiency of dispersion of very clayey and very weathered soils, in which pseudosilt was present and performed functional behavior in the modeling of soil compaction. Using the judgment criteria tested, it was possible to diagnose the occurrence of compaction with 99% accuracy, present in all pedoenvironments and in all management systems evaluated, with greater occurrence in layers immediately below the surface. While this is not a problem in sandy and medium-textured soils, in clayey and particularly very clayey soils it is a reality that demands efforts by farmers to mitigate it.

Keywords: Physics of tropical soils, relative density; degree of compaction; soil macroporosity; no-tillage; pseudosilt.

1. Introdução

O agronegócio no Brasil desempenha papel de relevância no cenário global e contribui expressivamente para a segurança alimentar mundial (Gil *et al.*, 2018). Os campos de produção, especialmente nas vastas regiões recobertas pelo bioma Cerrado, são impulsionados pelo uso de tecnologias avançadas, tornando o principal centro de produção de commodities no país (Silva *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2025). Porém, e por mais competitiva em produtividade, trazendo riscos pelo uso indiscriminado de insumos ou pela degradação dos recursos naturais, culminando em aumento de custos de produção ou perda da qualidade ambiental (Huang *et al.*, 2022; Jacobs *et al.*, 2022) e provocando euforia e preocupação sobre a sustentabilidade da atividade agropecuária (Silva *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2023).

Para lidar com essa realidade, é fundamental o conhecimento acerca das potencialidades e limitações do recurso solo. Na região do Cerrado encontram-se os solos mais velhos do mundo e pertencentes à ordem dos Latossolos [Oxisols in USA Soil Taxonomy, USDA (2022); Ferralsols in the World Reference Base for Soil Resources, IUSS Working Group WRB (2022)] em associação aos solos arenosos pouco desenvolvidos pedogeneticamente e classificados como Neossolos Quartzarênicos [Entisols (Quartzipsamments) in Soil Taxonomy; Arenosols in WRB], que são semelhantes, porém, morfologicamente (Rezende *et al.*, 2024). São ordens que respondem pela maioria dos sistemas agropecuários de sequeiro e que se destacam por condições físicas condicionantes a agricultura altamente mecanizada (como a inserção em relevos suavizados, a boa drenagem e a elevada profundidade efetiva), dada a estabilidade estrutural e friabilidade (Schaefer *et al.*, 2004; Cavalieri *et al.*, 2009) independentes da classe textural (Reatto *et al.*, 2009). No entanto, são altamente suscetíveis à compactação (Severiano *et al.*, 2013) ameaçando não apenas a produção, mas os serviços ecossistêmicos que os solos oferecem.

A compactação tem origem na compressão do solo não saturado, pela aplicação de carga pelo maquinário ou do pisoteio animal, que durante a densidade do solo sofre incremento em função da redução da porosidade ocupada pelo ar, sendo o principal problema agroambiental do mundo por ser a precursora de outras formas de degradação (Keller *et al.*, 2007; Severiano *et al.*, 2011a; Schjønning *et al.*, 2015; Botta *et al.*, 2018; Peixoto *et al.*, 2020). No Brasil, está disseminada em todas as regiões produtoras e até em pedoambientes de alta performance agrônômica (Lima *et al.*, 2023) e sob sistemas conservacionistas como em plantio direto ou integração lavoura-pecuária (Cegagno *et al.*, 2016; Lima *et al.*, 2025), desencadeando problemas ambientais como a erosão do solo, a alteração no ciclo hidrológico com consequências na recarga hídrica subterrânea e no assoreamento de mananciais de superfície que comprometem a qualidade da água, contribuindo para a eutrofização à custa da perda da fertilidade do solo. Assim, as plantas ficam com capacidade reduzida de absorção de água e nutrientes que afetam consequentemente, o potencial produtivo destas áreas e motiva

equivocadamente os fazendeiros a realizarem operações de revolvimento da camada arável (Peixoto *et al.*, 2020).

Pelo exposto é que a pesquisa agropecuária tropical tem priorizado a compreensão (compressão) e modelagem (Severiano *et al.*, 2011b; Lima *et al.*, 2023; Peixoto *et al.*, 2022), com enfoque na avaliação das alterações estruturais do solo e no desenvolvimento das plantas sem, contudo, avançar em proposição acerca da diagnose aplicada em larga escala e exequível por técnicos e fazendeiros nas tomadas de decisão acerca da mitigação (Peixoto *et al.*, 2019a). Torna-se ainda mais relevante ao considerar, entre os aspectos edáficos de manejo, apenas os relacionados ao comportamento físico do solo, não dispor de ferramenta de diagnose para subsidiar as ações de manejo e mitigação (Malavolta *et al.*, 1997; Sousa e Lobato, 2004; Mendes *et al.*, 2019).

O componente fundamental está na definição dos atributos indicadores de qualidade ou degradação, bem como dos critérios de interpretação de resultados associados aos desafios analíticos de solos altamente intemperizados e ricos em óxidos de ferro ou alumínio (Vitorino *et al.*, 2003; Barbosa *et al.*, 2021), sendo o maior desafio metodológico, a validação de resultados em solos contrastantes com base num único julgamento. Há subsídios fortemente embasados na literatura que o grau de compactação do solo, também conhecida por densidade relativa, seja o conceito mais adequado para avaliar as alterações estruturais decorrentes do uso e das práticas de manejo do solo (Håkansson, 1990; Reichert *et al.*, 2009). No entanto, a definição de valores de densidade do solo críticos de referências deve estar alinhada às múltiplas funções ecossistêmicas do solo e serem capazes de refletir a heterogeneidade pedológica. A aplicação de funções de pedotransferência pode tornar-se uma alternativa viável de enfrentamento deste importante entrave.

A hipótese deste trabalho é que a diagnose da compactação do solo em pedoambientes de produção agropecuária passa pela definição de atributos indicadores da estrutura para o seu funcionamento nos limites ecossistêmicos. Com esta pesquisa objetivou-se avaliar: I - os indicadores de qualidade física do solo em fazendas de soja no Cerrado brasileiro; II - o impacto do uso e sistemas de manejo nas alterações estruturais do solo e; III - a eficácia da proposição de uma ferramenta de diagnose da compactação do solo.

2. Material e Métodos

2.1. Identificação da área de estudo e descrição das fazendas

O estudo foi desenvolvido com amostras de solo coletadas de lavouras de soja na região sudoeste do estado de Goiás, Brasil, abrangendo 45 propriedades nos municípios de

Montes Claros, São João da Paraúna, Paraúna, Caiapônia, Indiara, Acreúna, Montividiu, Joviânia, Mineiros, Pontalina, Rio Verde, Jataí e Castelândia (Figura 1). É uma das regiões com maior emprego de tecnologias agropecuárias do mundo, cujos campos de produção estão inseridos em relevos pouco movimentados e nos solos mais velhos do mundo, datados do Cretáceo e do Terciário, segundo Marques *et al.* (2004) e com grande destaque para os Latossolos e Neossolos Quartzarênicos (Santos *et al.*, 2018), ajudando a explicar o avanço da agricultura mecanizada e intensiva (Severiano *et al.*, 2013).

O clima é classificado de acordo com Köppen, como Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual da região é de 25°C e a média pluviométrica anual é de aproximadamente 1600 mm, com a máxima precipitação em janeiro e menores em junho, julho e agosto ($< 50 \text{ mm mês}^{-1}$).

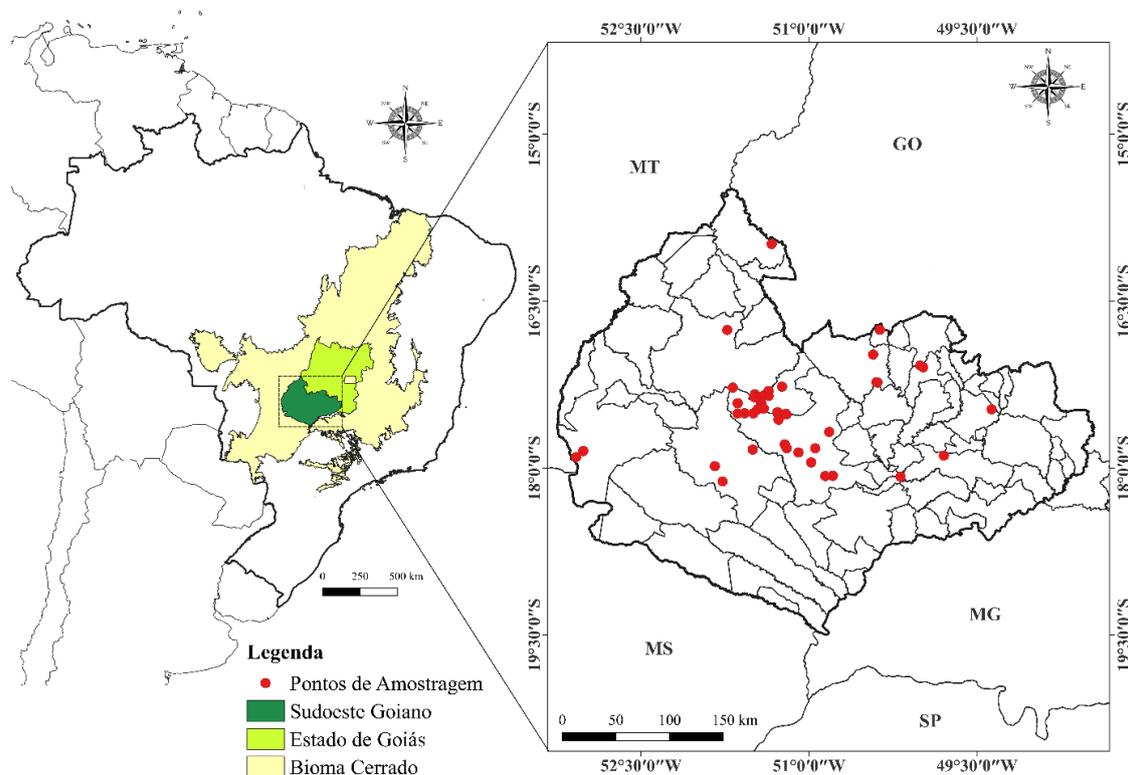


Figura 1. Mapa político do Brasil mostrando o Bioma Cerrado, o Estado de Goiás e o sudoeste goiano; e (c) pontos representando os locais de amostragem.

As lavouras foram definidas a partir da análise de desempenho por até seis safras (2017 a 2022) e em 220 mil hectares e localizados em 210 propriedades rurais pertencentes a 43 fazendeiros de um Grupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano (GAPES).

Adicionado a estas, foram inseridas fazendas com destacados manejo do solo ou com características morfológicas representativas dos campos de produção e, das quais, foram selecionadas 45 lavouras sendo as 15 mais produtivas, 15 com produtividade intermediária e as 15 menos produtivas, considerando as medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) da média. A descrição, bem como os aspectos de manejo do solo estão apresentadas no anexo (Tabela C, Anexo B).

2.2. Amostragem de solo e avaliações em campo

A amostragem foi realizada após a colheita da soja referente à safra 2022. Foram definidos, por meio de transecto na posição central do talhão, localizados em campo com aparelho receptor de GPS (Global Position System), cinco pontos e 50 m equidistantes no sentido da declividade do terreno, sendo as respectivas repetições experimentais em cada área.

Em cada ponto, foram coletadas nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, amostras indeformadas de solo, ocasião que se encontrava com o conteúdo de água próximo à capacidade de campo totalizando 675 amostras (45 fazendas x 5 pontos x 3 camadas). Para tanto, foram utilizados anéis volumétricos metálicos de 0,054 m de diâmetro e 0,06 m de altura e introduzidos com o auxílio de um amostrador de solo tipo macaco hidráulico. Fotografias dos procedimentos de amostragens são apresentados na Figura A do Anexo.

2.3. Determinações de laboratório

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano. As da camada intermediária (0,10-0,20 m) foram inicialmente preparadas e eliminando o solo excedente ao volume dos cilindros, as sobras foram secadas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm de diâmetro para obtenção da terra fina seca ao ar.

Foram determinadas a densidade de partículas (D_p), pelo método do balão volumétrico, e a textura (neste trabalho, este termo é usado para referir-se à distribuição de partículas por tamanho da fração mineral), via agitação lenta (50 rpm) por 16 horas para

dispersão física e NaOH 1N em contato com a amostra durante 24 horas, como dispersante químico. As partículas de areia (diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm) foram quantificadas por tamisagem, silte (0,05 - 0,002 mm) e argila (<0,002 mm) por sedimentação diferencial pelo método da pipeta, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017). Também foram determinados os conteúdos de carbono orgânico total (COT) pela oxidação com o dicromato de potássio (Teixeira *et al.*, 2017).

As amostras indeformadas foram saturadas através da elevação gradual de lâmina de água por 48 h e submetidas ao ensaio de permeabilidade de água (K0) com o uso de um permeâmetro de carga constante, conforme recomendações de Teixeira *et al.* (2017). Na sequência, foram equilibradas à tensão mátrica de -6 kPa em funis de placa porosa (Teixeira *et al.*, 2017), sendo esta considerada a microporosidade do solo (Micro) e o potencial do solo na capacidade de campo (Severiano *et al.*, 2011a; Silva *et al.*, 2021), e submetida ao ensaio de permeabilidade ao ar (Kear) em um permeâmetro desenvolvido por Silva *et al.* (2009), a partir da adaptação do instrumento de McKenzie & Dexter (1996), pelo método da pressão decrescente. Após, foi realizado o teste de penetrometria a -6 kPa (RP6) utilizando um penetrômetro de bancada MARCONI MA-933, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados, conforme Tormena *et al.* (1998).

Por fim, as amostras foram submetidas ao aparelho extrator de Richards, equilibradas a -100 kPa (Teixeira *et al.*, 2017), novamente ao teste de penetrometria (RP100) e juntamente com as amostras das outras camadas já preparadas, levadas para estufa a 105°C por 48 horas para determinação da densidade do solo (Ds) através da relação entre a massa seca e o respectivo volume (Teixeira *et al.*, 2017).

A porosidade total (PT) foi determinada pela equação 1, enquanto a macroporosidade do solo (Macro) foi obtida pela diferença entre PT e Micro (Teixeira *et al.*, 2017), em que D_p é a densidade de partículas. Também foi determinada a relação entre macro e microporos (MacMic).

$$PT = [1 - (D_s/D_p)] \quad \text{Eq. 1}$$

A água disponível, neste trabalho designada como água prontamente disponível (APD), foi calculada pela equação 2, em que θ_6 é o conteúdo de água equivalente à

capacidade de campo/tensão mátrica de -6 kPa e θ_{100} é o conteúdo de água crítico e equivalente à tensão mátrica de -100 kPa.

$$APD = \theta_6 - \theta_{100} \quad \text{Eq. 2}$$

A capacidade de campo relativa (CCr) foi definida conforme Reynolds *et al.* (2008) e calculada pela equação 3, em que θ_{CC} é o conteúdo de água equivalente à capacidade de campo/tensão mátrica de -6 kPa e θ_s é o conteúdo de água do solo saturado.

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

Também foi calculado o índice de estabilidade estrutural proposto por Pieri (1992) para avaliação do risco de degradação estrutural em solos cultivados (Equação 4), a partir dos conteúdos de COT, Argila e Silte.

$$ISE = \frac{1,724COT}{(Argila + Silte)} \cdot 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Os procedimentos analíticos recomendados por Teixeira *et al.* (2017) são métodos oficiais adotados no Brasil, mas que estão alinhadas aos protocolos analíticos internacionais, conforme demonstrado na tabela B (anexo).

2.4. Análise estatística

Os resultados obtidos nas amostras da camada de 0,10-0,20 m foram submetidos a análise exploratória por meio de estatística descritiva e de componentes principais e, para esta última, as variáveis foram previamente padronizadas ($\frac{Y_i - \mu}{\sigma}$). Esta análise foi realizada com objetivo de verificar a contribuição individual na variabilidade total do conjunto de dados, bem como de compreender de forma global a discriminação das fazendas. As correlações foram estimadas e classificadas como baixas ($r \leq |0,39|$), moderadas ($|0,40 < r \leq$

0,70|) e altas ($r > |0,70|$).

A densidade do solo relativa (D_{srel}), calculada pela equação 5, foi utilizada para avaliar as alterações estruturais pela compactação do solo em decorrência dos sistemas e práticas de manejo adotadas nas fazendas, conforme instruções de Håkansson, (1990).

$$D_{srel} = D_s / D_{sref} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que D_{sref} é a D_s limitante (D_{sl}) às funções edáficas (agronômicas e ambientais) do solo e sendo esta considerada o valor de D_s correspondente à macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Vomocil & Flocker, 1966), sendo obtida testando duas funções de pedotransferência (FPTs) propostas por Rezende *et al.* (2025), em função dos conteúdos de argila ou de argila + silte (equações 6 e 7) e que são ilustradas no anexo (Figura B), de modo a avaliar o efeito do fracionamento das partículas dispersas pelo procedimento analítico padrão adotado.

$$D_{sl} = 1,8917 - 0,009 \text{ argila}; R^2 = 0,97^{**} \quad \text{Eq. 6}$$

$$D_{sl} = 1,9034 - 0,008 \text{ argila} + \text{silte}; R^2 = 0,97^{**} \quad \text{Eq. 7}$$

Com objetivo de verificar as variáveis afetadas pela compactação do solo, foi realizada a análise de trilha considerando D_{srel} a variável dependente e os atributos avaliados como variáveis independentes. Para definição do diagrama causal foi realizada análise de regressão linear múltipla utilizando o procedimento “Stepwise” com a opção “backward”. Posteriormente, foi realizado o diagnóstico de multicolinearidade, considerando como fator de condição, a razão entre o maior e o menor autovalor para verificar se é fraca não constituindo problema para a análise. As contribuições dos efeitos diretos e indiretos das variáveis foram quantificadas percentualmente, sendo consideradas como alto efeito direto aqueles superiores a 70% (Ribeiro *et al.*, 2019).

Na sequência, foi realizado o teste de razão de verossimilhança para comparar os modelos regressão linear múltipla com menos variáveis, sendo este procedimento validado pelos valores observados como variáveis dependentes e os preditos como independentes, conforme a equação 8:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad \text{Eq. 8}$$

em que, Y é o valor observado, X é o valor predito, β_0 é o intercepto da equação e β_1 é coeficiente angular da equação. A regressão foi avaliada de acordo com as seguintes hipóteses Estatísticas (Neter *et al.*, 1996):

$$H_0: \beta_0 = 0 \text{ e } \beta_1 = 1$$

H_1 : rejeita H_0

Todas estas análises estatísticas foram realizadas utilizando os pacotes “corrplot”, “lavaan” e “semPlot” do programa computacional R Development.

Para diagnose da compactação do solo, foi considerada o atendimento aos seguintes critérios de julgamento da D_s pela condição estrutural do solo, considerando as FPTs (Figura B, anexo) de Rezende *et al.* (2025):

1. Para solos sem compactação:

- Se $D_s > D_{si}$, atende ao critério da densidade do solo compatível a solos bem manejados e sem compactação (“Sim”), e;
- Se $D_s < D_{si}$, não atende ao critério da densidade do solo inicial pelos baixos valores de D_s , menores que o solo em condições naturais (“Não”).

2. Para solo compactados:

- Se $D_s > D_{sl}$ e $\text{Marco} < 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, atende ao critério da densidade do solo limitante (“Sim”);
- Se $D_s < D_{sl}$ e $\text{Marco} < 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, não atende ao critério da densidade do solo limitante por incompatibilidade de valores de D_s e macro (“Não”), e;
- Se $D_s > D_{sl}$ e $\text{Marco} > 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, também não atende ao critério da densidade do solo limitante por incompatibilidade de valores de D_s e macro (“Não”).

Os dados categóricos ("Sim"/"Não") foram convertidos em valores binários (1 para "Sim" e 0 para "Não") para a análise quantitativa. Em seguida, foi calculado a acuracidade do critério (quantidade de “Sim” no total de 225 amostras julgadas) e aplicado o teste

binomial para comparar os contrastes estabelecidos entre D_{si} e D_{sl} , argila e argila + silte. Os testes foram realizados no software R, utilizando o pacote “binom.test”.

Por fim, os valores de D_s em função do conteúdo de argila ou de argila + silte e obtidos em cada fazenda foram plotados figura 2, considerando para tal, os resultados de maior acuracidade.

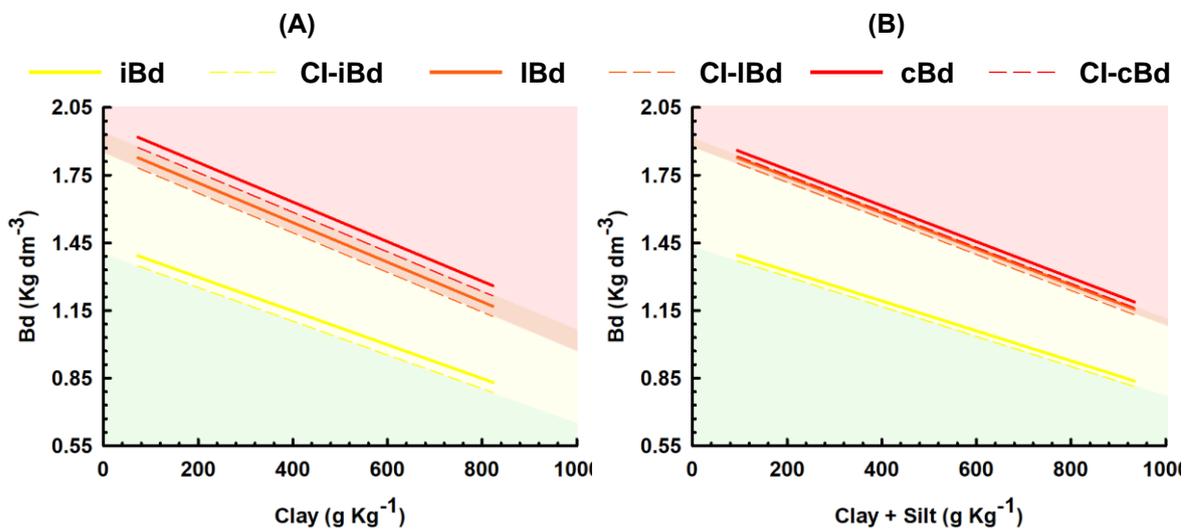


Figura 2. Funções de pedotransferência para diagnose da compactação do solo, com destaque para a densidade do solo inicial (D_{si}) e limitante à macroporosidade do solo, em função do conteúdo de argila + silte de Latossolos da região do cerrado brasileiro.

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

3. Resultados

Os momentos estatísticos de altitude das fazendas e dos atributos físicos do solo avaliados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Momentos estatísticos da altitude, das características físicas e dos atributos indicadores de qualidade estrutural do solo em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

Natureza do atributo	Variável	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	Coefficiente de Variação	Mínimo	Máximo
Posição	Altitude	809	147	22	18,1	362	1005
Característica física	Areia	334	249	37	74	26	889
Característica física	Silte	181	120	18	66	9	559
Característica física	Argila	485	174	26	36	89	727
Característica física	Dp	2,66	0,11	0,02	4,33	2,49	2,96
Fluxo/Intensidade	K0	31,96	39,85	5,94	124,72	0,47	171,05
Fluxo/Intensidade	Kear	7,52	3,42	0,51	45,43	3,53	19,97
Massa/Volume	PT	0,54	0,04	0,01	8,14	0,46	0,63
Massa/Volume	Ds	1,22	0,12	0,02	10,00	1,05	1,49
Massa/Volume	Micro	0,35	0,07	0,01	20,23	0,15	0,45
Massa/Volume	Macro	0,19	0,05	0,01	24,46	0,07	0,32
Massa/Volume	MacMic	0,61	0,39	0,06	64,19	0,17	2,23
Massa/Volume	APD	0,07	0,02	0,00	21,99	0,04	0,10
Massa/Volume	CCr	0,65	0,11	0,02	16,28	0,32	0,87
Resistência mecânica	RP6	2,16	0,51	0,08	23,38	0,67	3,49
Resistência mecânica	RP100	4,08	1,04	0,16	25,52	0,89	5,91
Frações sólidas	COT	15,08	4,18	0,62	27,71	6,10	24,83
Frações sólidas	ISE	4,46	1,82	0,27	40,80	2,74	11,66

Altitude (m); Areia: partículas de diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm (g kg^{-1}); Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm (g kg^{-1}); Argila: partículas < 0,002 mm (g kg^{-1}); Dp: densidade de partículas (kg dm^{-3}); K₀: condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Kear: permeabilidade específica do solo do solo (μm^2); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); MacMic: relação macro: microporos (adimensional); RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa (MPa); RP100: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -100 kPa (MPa); APD: água prontamente disponível ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); CCr: capacidade de campo relativa (adimensional); COT: carbono orgânico total (g kg^{-1}); ISE: índice de estabilidade estrutural do solo (%).

A análise de componentes principais discriminou as variáveis em duas dimensões capazes de explicar conjuntamente 75,9% da variabilidade dos resultados (Figura 3). A primeira dimensão (Dim1) explicou 62,9%, apresentando correlação alta e negativa ($r < -0,70$) com Silte, Argila, Micro, RP6, RP100, CCr e COT, e alta e positiva ($r > 0,70$) com Areia, K0, Ds, Macro, MacMic e ISE. A segunda (Dim2) explicou 13% da variação total dos dados, apenas com correlações moderadas para a maioria dos atributos.

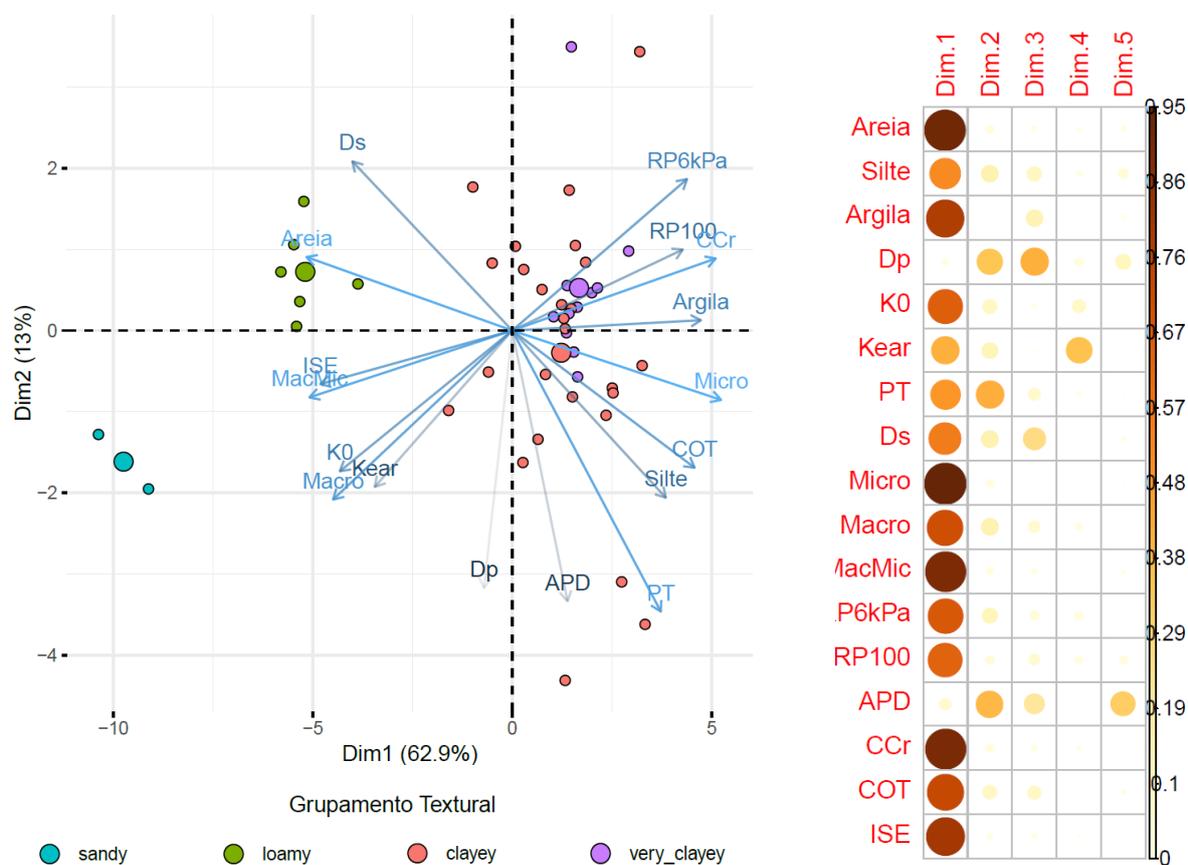


Figura 3. Dispersão bidimensional dos escores da análise de componentes principais de 17 variáveis avaliadas em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

Areia: partículas de diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm (g kg^{-1}); Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm (g kg^{-1}); Argila: partículas $< 0,002$ mm (g kg^{-1}); K₀: condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Kear: permeabilidade específica do solo do solo (μm^2); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); MacMic: relação macro:microporos (adimensional); RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa (MPa); RP100: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -100 kPa (MPa); APD: água prontamente disponível ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); CCr: capacidade de campo relativa (adimensional); COT: carbono orgânico total (g kg^{-1}); ISE: índice de estabilidade estrutural do solo (%).

As correlações entre os autovetores dos atributos na PCA (Figura 3) demonstram a alta influência da textura do solo nas relações de massa e volume dos seus constituintes (Areia e Micro, Silte e Ds, Argila e Macro ou MacMic apresentaram alta correlação negativa; Areia e Ds, Silte e PT ou APD, Argila e CCr ou Micro apresentaram alta correlação positiva), nas

medidas de fluxo (Argila e K_0 ou Kear apresentaram alta correlação negativa), na resistência mecânica (Argila e RP6 ou RP100 com alta correlação positiva) e nos indicadores de qualidade associados às frações sólidas (Areia e COT, Argila e ISE com alta correlação negativa; Silte e COT com alta correlação positiva). Destaca-se ainda a alta correlação positiva entre RP6 e RP100 e entre Macro e as duas medidas de fluxo.

A contribuição das variáveis com os componentes principais atesta a importância das relações de massa e volume dos constituintes do solo, com todos os indicadores avaliados presentes em pelo menos uma das duas dimensões principais (Figura 4). Areia, ISE, argila e COT na primeira, COT e Kear na segunda também tiveram contribuições ao passo que K_0 , RP6 e RP100 não contribuíram (Figura 4).

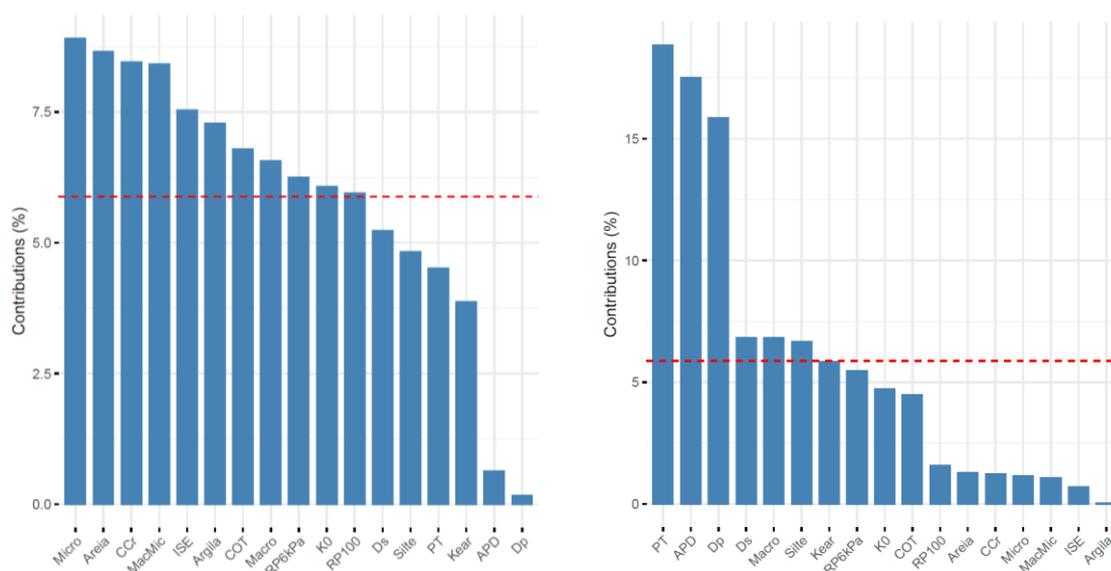


Figura 4. Contribuição das variáveis com o primeiro (A) e o segundo componente principal (B) avaliadas em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

Areia: partículas de diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm (g kg^{-1}); Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm (g kg^{-1}); Argila: partículas < 0,002 mm (g kg^{-1}); K_0 : condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Kear: permeabilidade específica do solo do solo (μm^2); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); MacMic: relação macro:microporos (adimensional); RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa (MPa); RP100: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -100 kPa (MPa); APD: água prontamente disponível ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); CCR: capacidade de campo relativa (adimensional); COT: carbono orgânico total (g kg^{-1}); ISE: índice de estabilidade estrutural do solo (%).

Pelas análises de regressão múltipla, verificou-se diferenças entre os atributos físicos das variáveis selecionadas por meio do procedimento estatístico adotado e da estimativa da densidade relativa em função do conteúdo de argila ($\text{Dsrel}_{\text{argila}}$) ou argila + silte ($\text{Dsrel}_{\text{argila} + \text{silte}}$). Ao considerar a variável dependente $\text{Dsrel}_{\text{argila}}$, Macro, Micro e APD foram mantidas no modelo para explicar o processo de compactação, ao passo que a estimativa de $\text{Dsrel}_{\text{argila} + \text{silte}}$ apresentou

maior capacidade preditiva e manteve Macro, K0 e RP6 no modelo (Tabela 2) e com coeficientes de determinação R^2 de inferior (0,54) e superior (0,72), respectivamente.

Através desta análise foram desdobradas as correlações entre as variáveis, obtendo coeficientes de trilhas, ou seja, efeitos diretos e indiretos das variáveis mantidas em cada modelo com a variável dependente. Macro apresentou as maiores correlações, negativa e moderada com $Dsrel_{argila}$ e negativa e alta com $DSrel_{argila + silte}$, sendo está a variável com maior efeito direto enquanto as demais apresentaram efeitos majoritariamente indiretos.

Tabela 2. Efeitos diretos e indiretos, correlação e coeficiente de determinação (R^2) de diagrama causal da regressão múltipla de determinação da densidade do solo relativa em função dos atributos indicadores físicos em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

Variáveis independentes	Efeito direto		Efeitos indiretos		Correlação	R^2
	Coefficiente	%	Coefficiente	%		
Modelo 1: $Dsrel$ estimada a partir do conteúdo de argila do solo						
Macro	-1,00***	69,7	0,43	30,3	-0,56***	
Micro	-0,525**	42,7	0,705	57,3	0,18	0,54
APD	0,251*	29,8	-0,591	70,2	-0,34*	
Modelo 2: $Dsrel$ estimada a partir do conteúdo de argila + silte do solo						
Macro	-0,872**	94,78	0,048	5,22	-0,82***	
K0	0,354*	27,76	-0,921	72,24	-0,57***	0,72
RP6	0,251	34,06	0,486	65,94	0,74***	

K₀: condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa; APD: água prontamente disponível.

*** significativo a 0,1%; ** significativo a 5% de probabilidade.

Funções de pedotransferência utilizadas para determinação de $Dsrel$ ($Dsrel = Ds/Dsl$): $Dsl = 1,8917 - 0,009 argila$ ou $Dsl = 1,9034 - 0,008 argila + silte$. Fonte: Rezende et al. (2025).

A figura 5 apresenta graficamente a análise de trilha, em que a Macro mostra com maior força em relação à causa e efeito com a compactação do solo e com coeficientes de trilha diretos de -1,00 ou -0,88 para $Dsrel_{argila}$ ou $Dsrel_{argila + silte}$, respectivamente (Figura 5). A correlação entre as variáveis independentes dos modelos apresenta-se alta e negativa entre Macro e Micro ($r = -0,79$) e baixas entre Macro e APD ($r = -0,08$) ou entre Micro e APD ($r = 0,32$) (Figura 5A), enquanto alta e positiva entre Macro e K0 ($r = 0,80$) e alta e negativa entre Macro e RP6 ($r = -0,84$) ou K0 e RP6 ($r = -0,76$) (Figura 5B).

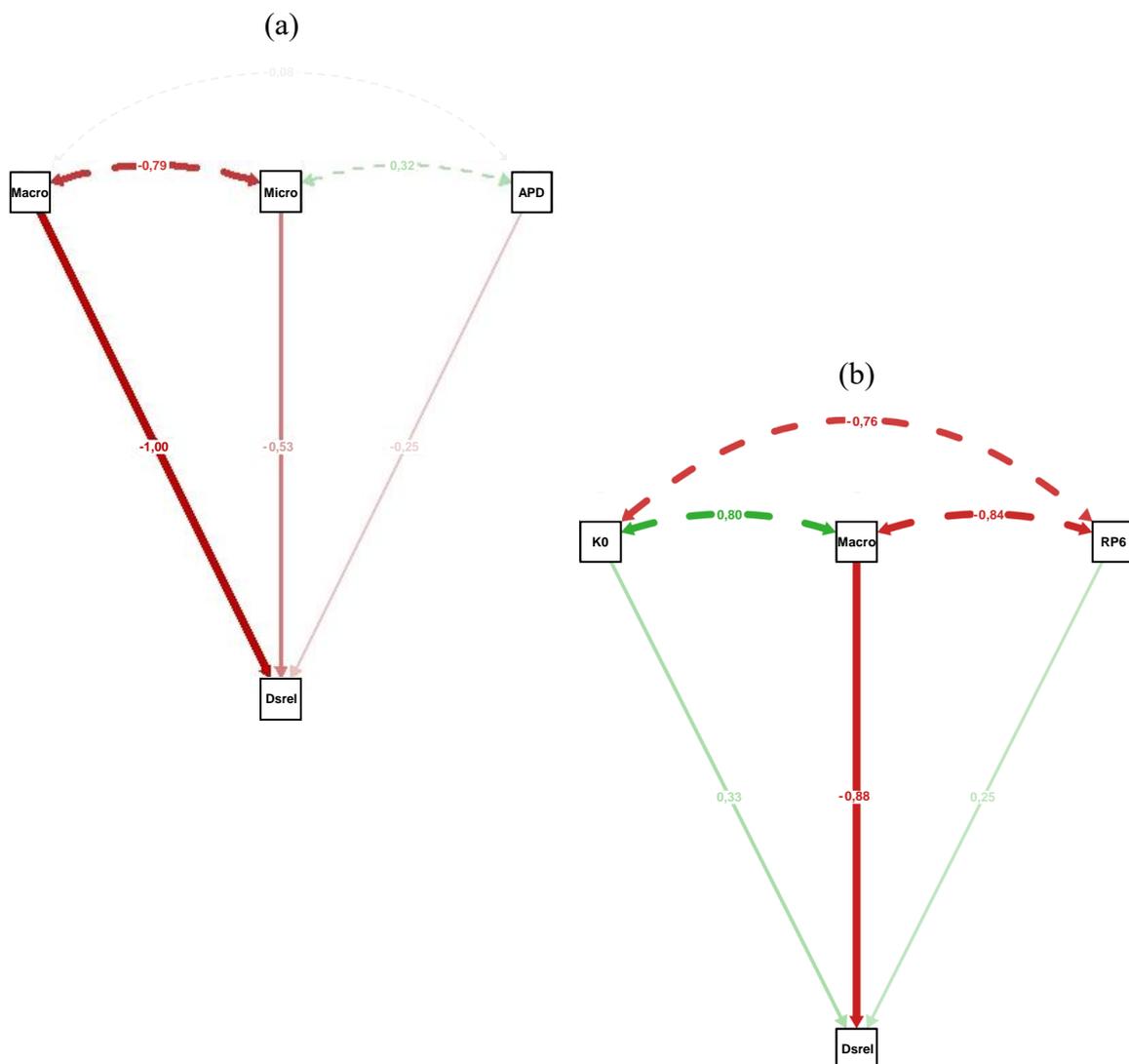


Figura 5. Diagrama causal mostrando as correlações entre as variáveis independentes (linha tracejada) e as relações causa-efeito com a compactação do solo (linha cheia), estimada por meio da densidade relativa obtida por funções de pedotransferência a partir do conteúdo de argila (a) e argila + silte (b) em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

K_0 : condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa; APD: água prontamente disponível.

Funções de pedotransferência utilizadas: $Dsrel = 1,8917 - 0,009 \text{ argila}$ ou $Dsrel = 1,9034 - 0,008 \text{ argila} + \text{silte}$. Fonte: Rezende et al. (2025).

Ao comparar o modelo 2 da análise em trilha com o modelo 3 pelo teste de razão de verossimilhança, constata-se que ausência de diferenças entre os mesmos e, ao comparar os modelos 3 e 4, também não se verifica diferenças. Dessa forma, o modelo apenas com Macro não causa perda de informações significativas, comprovado pelas pequenas diferenças nos coeficientes de determinação e nos quadrados médios do erro. Os três modelos foram validados com o valor real em função do valor predito, sendo observado em todos $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$.

Tabela 3. Relações de regressão simplificadas entre propriedades do solo e densidade relativa (Dsrel) estimada a partir do conteúdo de argila + silte do solo para todos os solos das fazendas de soja no cerrado brasileiro.

Modelo	Intercepto	Macro	K0	RP6	R ² ajustado	$\sqrt{Q_{Merro}}$
2	-0,029 ^{ns}	-0,872***	0,354*	0,251 ^{ns}	0,72	0,54
3	0,026 ^{ns}	-1,032***	0,285 ^{ns}		0,69	0,56
4	0,012 ^{ns}	-0,819***			0,67	0,58

Macro: macroporosidade do solo; K₀: condutividade hidráulica do solo saturado; RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa.

Determinação de Dsrel pela função de pedotransferência proposta por Rezende *et al.* (2025): $Dsrel = 1,9034 - 0,008 \text{ argila} + \text{silte}$.

Pela figura 6, observa-se maior acuracidade de julgamento das condições estruturais do solo quando adotado os critérios de Dsl e do conteúdo de argila + silte. A comparação binomial apontou significância em três dos quatro testes realizados, a exceção ocorreu em Dsl, em que o atendimento do critério de julgamento apareceu na mesma proporção, independente da estimativa em função dos conteúdos de argila ou de argila + silte.

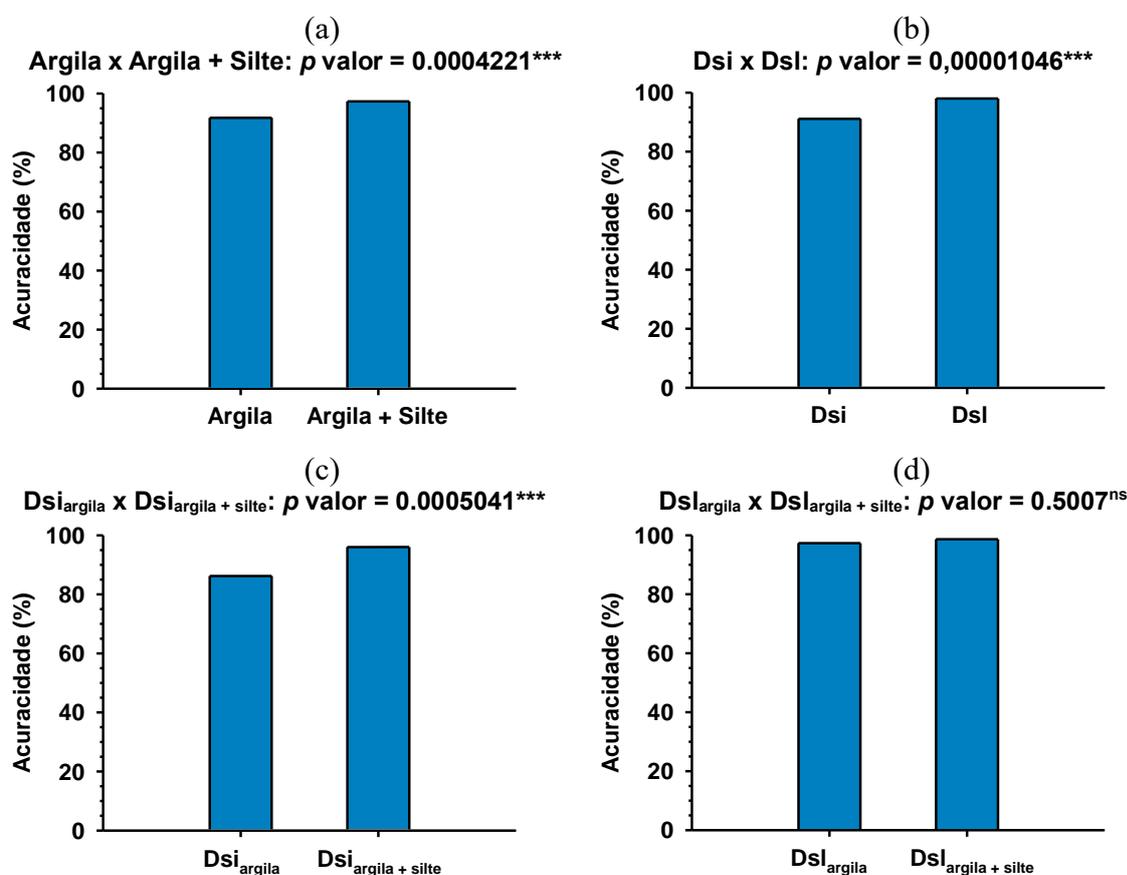


Figura 6. Acuracidade no julgamento da compactação do solo em função dos conteúdos de argila ou argila + silte, e da densidade do solo inicial (Dsi) ou limitante (Dsl), pelo teste binomial de comparação das proporções em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

***Significância estatística no nível de 0,001; ^{ns}: Não significativo.

Na Figura 7, é realizado o diagnóstico da compactação do solo a partir das amostras analisadas nas fazendas avaliadas e determinadas pela relação da densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte, considerando ainda as FPTs no julgamento.

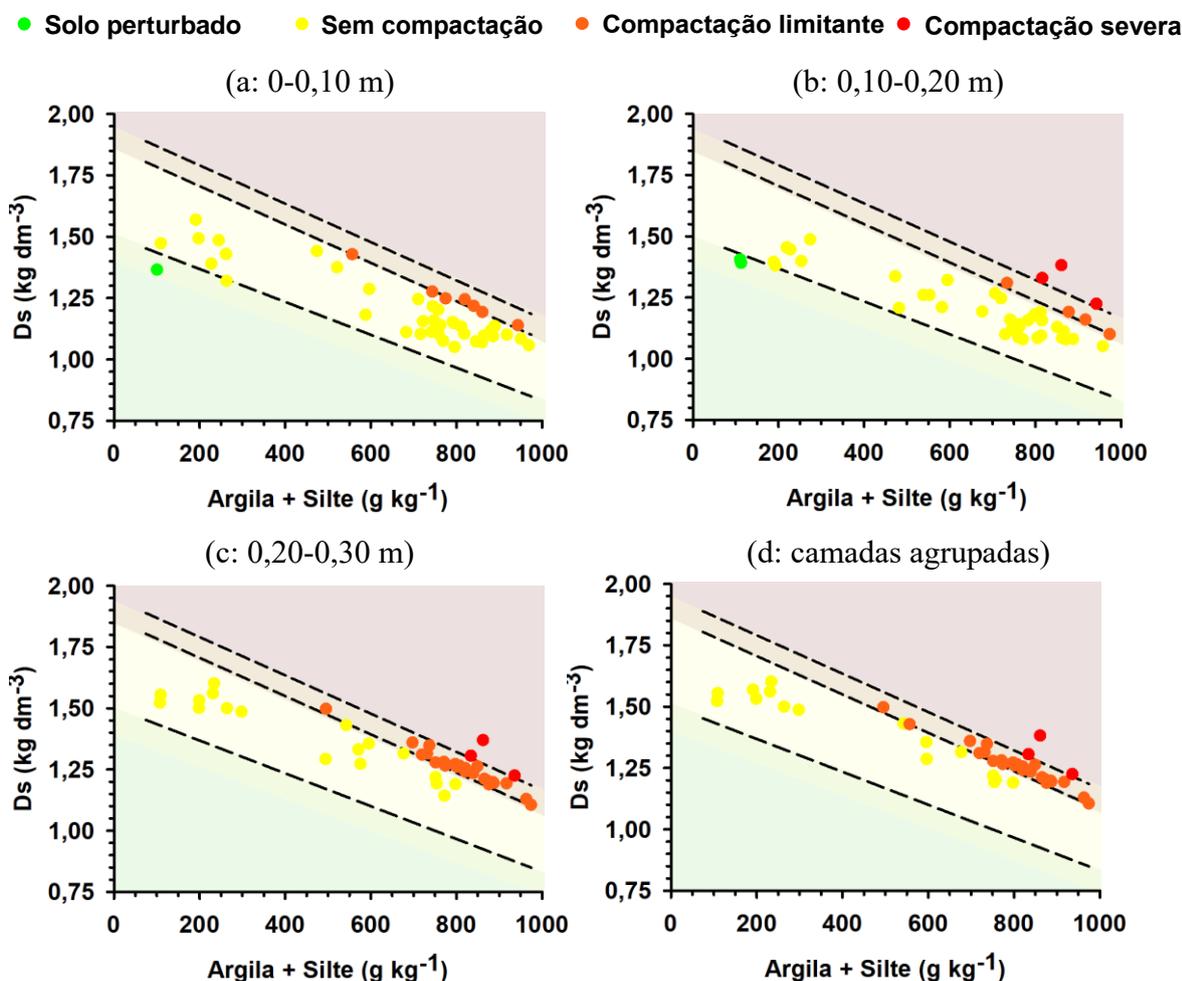


Figura 7. Distribuição dos valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte em fazendas de soja no cerrado brasileiro. A área sombreada representa os seguintes critérios de julgamento: - abaixo do limite superior do intervalo de confiança de D_{si} (verde): solo perturbado; - entre o limite superior do intervalo de confiança de D_{si} e o inferior de D_{sl} (amarelo): sem compactação; - entre intervalo de confiança de D_{sl} (laranja): compactação limitante e; - acima do limite superior do intervalo de confiança de D_{sl} (vermelho): compactação severa.

Corroborando os resultados da Figura 7, que apresentam indicativo que as fazendas podem ou não apresentar compactação do solo do solo sem, no entanto, indicar os possíveis fatores que contribuem para a degradação, a Tabela 4 classifica as áreas pelas alterações estruturais do solo. Observa-se o incremento das áreas com compactação limitante ou severa

com o aumento da profundidade do solo e com incremento de frações finas na granulometria. Entre sistemas de manejo ou pedoambientes de produção, há predominância de compactação do solo limitante às funções edáficas reguladas pela estrutura do solo.

Tabela 4. Quantitativo de fazendas de soja no cerrado brasileiro, classificadas de acordo com a Figura 7, usando os valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte.

Variável	Perturbado	Sem compactação	Compactação limitante	Compactação severa	Total
Camada do solo					
0-0,10 m	0	41	4	0	45
0,10-0,20 m	0	38	4	3	45
0,20-0,30 m	0	18	18	9	45
Total	0	18	18	9	45
Textura do solo (argila + silte) ¹					
< 180 g kg ⁻¹ (arenosa)	0	2	0	0	2
181-410 g kg ⁻¹ (média)	0	6	0	0	6
410-694 g kg ⁻¹ (argilosa)	0	6	1	0	7
> 695 g kg ⁻¹ (muito argilosa)	0	4	17	9	30
Sistema de manejo ²					
Plantio direto	0	13	13	4	30
Integração lavoura-pecuária	0	3	2	4	9
Pivô	0	2	3	1	6
Pedoambientes ³					
Mais produtivos	0	4	7	4	15
Intermediários	0	7	6	2	15
Menos produtivos	0	7	5	3	15

¹: Determinada pelo método de pipeta, com dispersão por agitação lenta por 16 horas, partículas de areia (2,00-0,05 mm) quantificadas por peneiramento, partículas de argila por pipetagem (< 0,002 mm) e silte por diferença (0,05-0,002 mm). ^{2,3}: Critérios de classificação qualitativo (baseados na percepção dos fazendeiros).

4. Discussão

4.1. Caracterização física de pedoambientes de produção em fazendas de soja no cerrado brasileiro

A produtividade média da soja nas fazendas avaliadas corrigida para umidade de 14% foi de 4,16 Mg ha⁻¹, que transformada na unidade comercial padrão no Brasil, foi 69 sacas (sc = 60 kg) ou na unidade do mercado internacional, 153 bushels (27,22 kg) (Tabela A, Anexo).

Esta produtividade é superior à média local (no estado de Goiás, cujo rendimento médio é de 61 sc ha⁻¹; Conab, 2022), nacional (58 sc ha⁻¹ no Brasil) e até mesmo à média dos produtores de soja no mundo (USA: 57 sc ha⁻¹; Paraguai: 49 sc ha⁻¹; Argentina: 47 sc ha⁻¹; China: 33 sc ha⁻¹ e; Índia: 13 sc ha⁻¹), conforme levantamento realizado por USDA, 2024. É o resultado da revolução tecnológica da agricultura tropical realizada no cerrado brasileiro, em que até no grupo de fazendas de menor desempenho, 10 tiveram produtividades superiores a todos os indicadores.

Este desempenho é associado a pedoambientes muito contrastantes e que expressam a capacidade produtiva de lavouras em altitudes extremas para a cultura da soja e em solos contrastantes (Tabela 1), com fazendas de alta performance em áreas de areias francas a texturas muito argilosas, mas em contrapartida de apresentam elevada uniformidade morfológica (Santos *et al.*, 2018). Possibilitando a realização de práticas agrícolas mecanizadas semelhantes, e que resultam, no entanto, em alterações estruturais do solo em magnitudes distintas por causa do comportamento compressivo de cada solo. Neste ponto, os Neossolos Quartzarênico e Latossolos de textura média suportam a aplicação de elevadas cargas externas e com deformações estruturais desprezíveis, mas os argilosos e muito argilosos a compactação do solo é um processo praticamente inevitável (Severiano *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2021; Rezende *et al.*, 2025; Lima *et al.*, 2025).

A interação das características dos solos e dos manejos de produção contribuíram para alta variabilidade das propriedades indicadoras, cujas magnitudes foram de 0,4 (no caso do PT e Ds) a 362 vezes (em K0) (Tabela 1) e fazendo-se necessária a discriminação das fazendas quanto à ocorrência de eventuais restrições às funções do solo governadas pela estrutura. A análise de componentes principais demonstra a contribuição das relações de massa e volume dos constituintes do solo e com destaque à Micro, CCr, MacMic e Macro em Dim1 e PT, APD, Ds e Macro e em Dim2 (Figuras 3 e 4). Os resultados destacam a robustez destas relações e estão em concordância com Peixoto *et al.* (2022), que utilizando a técnica de *Machine learning* como ferramenta para o diagnóstico da compactação do solo, constataram que as variáveis mais importantes para prever os impactos sobre o rendimento da cultura foram os atributos de porosidade do solo (macroporosidade, total, microporosidade), e com Reynolds *et al.* (2009) quando da CCr. Estes autores constataram respostas imediatas de uso e manejo sob o espaço poroso do solo, sendo aqui atestados pela alta correlação negativa entre CCr e Macro, MacMic e K0, e alta e positiva com RP6, RP100, Micro e COT (Figura C, anexo).

É nítido, ainda, o efeito da textura do solo sob a PCA, tanto na distribuição no biplot dos solos conforme os grupamentos texturais (Figura 3) quanto na contribuição das frações (Areia e Argila em Dim1 e Silte em Dim2 – Figura 4). Este aspecto foi abordado por Severiano *et al.* (2013) que, estabelecendo as relações entre características e propriedades físicas com o comportamento compressivo de Latossolos representativos da região do cerrado brasileiro, apontaram relações inversamente proporcional entre argila e densidade do solo e diretamente à porosidade, além de mostrarem que a suscetibilidade à compactação destes aumentam proporcionalmente ao incremento das frações mais finas.

Este duplo efeito da textura do solo governou estes resultados e, segundo os autores, é uma característica particular desses solos que os tornam mais suscetíveis à compactação do mundo. Por outro lado, e embora as relações de massa e volume serem as que mais contribuíram com as componentes principais e de serem as medidas quantitativas mais diretas de avaliação das alterações estruturais, a influência exercida pela textura limita a interpretação destes resultados. Em contradição, e por apresentarem um mineralogia simplificada [os solos do cerrado brasileiro destacam-se por serem altamente intemperizados e por conter predominantemente caulinita e óxidos de ferro e de alumínio na fração argila, segundo Marques *et al.* (2004), Reatto *et al.* (2009), Severiano *et al.* (2013) e Santos *et al.* (2018)], estes solos desenvolvem microestrutura granular de morfologia maciça porosa *in situ* (Vitorino *et al.*, 2003; Schaefer *et al.*, 2004; Vollant-Tuduri *et al.*, 2005; Reatto *et al.*, 2009) cujas respostas agronômicas comumente são validadas para a textura do solo (Caires *et al.*, 2003; Sousa e Lobato, 2004; Severiano *et al.*, 2011a).

4.2. Impacto do uso e sistemas de manejo na avaliação das alterações estruturais do solo

A identificação dos impactos das práticas agrícolas adotadas pelos fazendeiros na melhoria ou degradação física depende, portanto, do isolamento dos efeitos da composição do solo por um atributo capaz de comparar os diferentes pedoambientes. Assumindo a densidade relativa [poderia também ser grau de compactação ($GC, \% = D_{srel} \times 100$)] como a relação que melhor descreve as alterações estruturais do solo, em concordância com Håkansson (1990) e Reichert *et al.* (2009).

O êxito da determinação está na obtenção de uma D_{sref} que reflete a condição estrutural do solo e, embora seja avaliada por diferentes metodologias [ex: ensaio de proctor normal

(Santos *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2023), a densidade de alerta (Silva *et al.*, 2021) ou crítica pelo intervalo hídrico ótimo (Cecagno *et al.*, 2016), ou ainda submetendo o solo à ensaios de compressão (Reichert *et al.*, 2009)] é uma variável altamente correlacionada à distribuição de partículas quanto ao tamanho. FPTs podem ser estabelecidas para estimar a primeira com base na última corrigindo a referida influência e, neste sentido, as propostas por Rezende *et al.* (2025) foram aqui consideradas pela integração multifatorial de aspectos reguladores das funções estruturais (aeração do solo, resistência mecânica, disponibilidade de água às plantas e recarga hídrica subterrânea) no valor de referência.

No entanto, é sabido e já identificado por diversos pesquisadores que os Latossolos muito intemperizados (como os estudados) os micropeds de argila apresentam alta resistência à dispersão pelo procedimento analítico padrão (Mayer *et al.*, 2002; Taurozzi *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 1999; Sá *et al.*, 2002; Ribeiro *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019; Vitorino *et al.*, 2003; Marcelino *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2021). Partindo da premissa que a textura é uma das características mais estáveis, e a importância na percepção do solo como todo (classificação, interpretação, recomendação, dentre outros), essas FPTs apresentam condição de contorno acerca da estimativa de D_{sref} , a partir dos conteúdos de argila ou de argila + silte, uma vez que o conteúdo de silte nestes solos é muito baixo e o pseudossilte é, na realidade, argila não dispersa (Vitorino *et al.*, 2003). Faz-se necessário, portanto, a correta quantificação da distribuição das partículas quanto ao tamanho e, ante esta inconsistência, investigar como premissa esta possibilidade, bem como as aplicações na avaliação das alterações estruturais do solo. Cabe ressaltar que a ciência do solo tropical tem se esforçado para solução metodológica deste problema (Lagacherie *et al.*, 2008; Zinn *et al.*, 2015; Molin e Tavares, 2019, Souza *et al.*, 2022; Benedet *et al.*, 2022; Mello *et al.*, 2025) mas sem solução definitiva até o momento, principalmente por considerar a correta caracterização do solo como o ponto de partida do planejamento de uso da terra.

Assim, foram estabelecidas as relações causais entre D_{srel} e os atributos avaliados considerando as D_{sl} estimadas pelas equações 6 e 7 e correspondentes à D_s em que a macroporosidade ($< 0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) torna-se limitante às funções edáficas do solo relacionadas à infiltração de água e recarga subterrânea. Segundo Severiano *et al.* (2011a), o prejuízo da compactação do solo na porosidade drenável, associada a esta condição, acontece antes da máxima restrição ao desenvolvimento das plantas cultivadas (os autores demonstraram que a D_{sl} é menor que a D_s crítica ao intervalo hídrico ótimo). A definição de D_{sref} por qualquer outra condição estrutural do solo predita pelas funções de Rezende *et al.* (2025) e são

apresentadas na figura B do anexo, no entanto, não alteraria o comportamento destes resultados. Estes autores constataram diferenças relacionadas somente ao coeficiente linear das equações, indicando que o incremento da fração argila reduz o valor de D_s de maneira semelhante, independente do estado de compactação em que o solo se encontra.

Constata-se então, pela análise da tabela 2, que as relações causais da regressão múltipla tiveram melhor explicação da variação dos resultados em $D_{srel_{argila + silte}}$ (maior R^2) sugerindo que o comportamento funcional do pseudossilte seja, de fato, composta em parte pela fração argila, e corroborando a todas as considerações acerca do efeito desta fração sobre a estrutura do solo (Aragón *et al.*, 2000; Braida *et al.*, 2006; Marcolin e Klein, 2011 e Luciano *et al.*, 2012; Severiano *et al.*, 2013). Reforça as investigações, a manutenção de Micro e APD no modelo que descreve a compactação do solo a partir da $D_{srel_{argila}}$, que são variáveis com forte relação com as frações finas (Figura 3) demonstrando que este modelo não conseguiu isolar totalmente o efeito textura do solo. Por outro lado, as variáveis independentes mantidas no modelo estimado a partir do conteúdo de argila + silte do solo englobam atributos de três naturezas físicas distintas (massa e volume para Macro, intensidade/fluxo para K_0 e de resistência mecânica para RP_6) sendo os de maiores contribuições na análise de componente principal entre os menos influenciados pela composição do solo (Figura 4).

Chama a atenção, o fato da maioria dos atributos avaliados não terem entrado nos modelos, em particular no de $D_{srel_{argila + silte}}$ e, notadamente daqueles relacionados à massa e volume dos constituintes do solo que além de serem a maioria das variáveis independentes (Tabela 1) foram as que mais contribuíram na discriminação dos resultados (Figuras 3 e 4). Por serem variáveis altamente correlacionadas entre si (como pode ser visto na Figura C do anexo), trazendo para a maior relação causal (Macro) a expressão dos resultados.

Também determinados na amostra indeformada, as medidas de intensidade foram representadas no modelo por K_0 pela alta correlação com Macro e contribuição acima da média na primeira dimensão da PCA (Figuras 3 e 4), embora seja este o atributo avaliado com a maior variabilidade de resultados (Tabela 1). Este comportamento é bastante conhecido em solos tropicais, estando fundamentalmente relacionados aos aspectos metodológicos adotados e ao volume elementar representativo da amostra, corroborando a e Ferreira *et al.* (2015) e Klein e Klein (2015). Ainda assim, demonstrou maior sensibilidade às alterações estruturais do solo em relação à K_{ear} que, por sua vez, e embora fortemente regida pela granulometria, umidade e compactação do solo (Mentges *et al.*, 2016), os resultados foram governados pela macroporosidade do solo, é o que expressa os autovetores nas componentes principais (Figura

3). Este comportamento está em concordância com Chen *et al.* (2014), que observaram redução da permeabilidade ao ar pela compactação, por sua vez associada às características geométricas do espaço poroso do solo (quantidade, tortuosidade e continuidade dos poros).

Cabe ressaltar, que em Latossolo muito intemperizados e Neossolos Quartzarênicos do cerrado brasileiro, a estrutura granular confere porosidade de aeração é excessiva (Cooper & Vidal-Torrado, 2005; Reatto *et al.*, 2007; Severiano *et al.*, 2011a; Rezende *et al.*, 2025) e somente torna-se limitante quando a estrutura estiver extremamente degradada [em elevado estado de compactação, segundo Silva *et al.* (2021) e Lima *et al.* (2025)]. Mesmo considerando os processos dinâmicos de fluxo de matéria e energia como os que melhor descrevem o comportamento do sistema solo (Horn e Kutilek, 2009), estes são dependentes do arranjo das partículas (Mentges *et al.*, 2016) tornando necessários a definição de relações entre atributos de capacidade e intensidade na compreensão dos processos do solo. Os resultados atestam, portanto, que mesmo com as alterações estruturais ocorridas, os poros do solo mantiveram-se interconectados quando do conteúdo de água na capacidade de campo, sendo representadas na relação causal por alta correlação entre Macro e K₀ (Figura 5B).

As medidas de resistência mecânica foram representadas no modelo por RP6 (Tabela 2). Por outro lado, pesquisas recentes têm sugerido a avaliação da resistência do solo à penetração em solos tropicais em condição de umidade mais seca à capacidade de campo (em conteúdos de água no solo equivalentes à potenciais matriciais de -30 a -500 kPa), destacando as diferenças entre os tratamentos e melhorando o diagnóstico de compactação do solo em sistemas conservacionistas contínuos (Zhang *et al.*, 2017; Peixoto *et al.*, 2019a). Em discordância, os resultados atestam que em solos granulometricamente contrastantes, a penetrometria na condições úmidas avaliada mais bem expressa a relação com o processo de compactação, estando em concordância a Peixoto *et al.* (2019b), que identificando a sensibilidade de indicadores físicos relacionados ao rendimento das culturas, classificou a resistência à penetração determinada em teor de água próximo à capacidade de campo, além da macroporosidade do solo os que mais afetam o rendimento da soja. Ademais, RP6 e RP100 apresentam alta correlação positiva (Figura 3 e C - anexo), sendo a variação dos dados mais bem explicada por RP6, dada a maior contribuição na composição dos componentes principais (Figura 4).

Por fim, cabe ressaltar a ausência dos atributos relacionados às frações sólidas na descrição do processo de compactação do solo (nem COT e nem ISE foram mantidos nos modelos de Dsrel - Tabela 2; Figura 5). Isto se deve ao fato das relações entre as frações

orgânicas e a física de solos tropicais ainda não serem bem compreendidas, os estudos são sempre pontuais e demonstram principalmente a relação inversa entre densidade do solo e grandes incrementos de carbono [a exemplo de Sá et al. (2013), considerando solos com até 300 g kg^{-1} de carbono orgânico]. Assim, esperaria relação inversa entre D_{sref} e COT, a exemplo dos apontamentos realizados por Braida *et al.*, (2006); Viana *et al.* (2011), Marcolin e Klein (2011), Luciano *et al.* (2012) e Broch e Klein (2017), que sugeriram influência positiva destas frações na densidade do solo. Ademais, cabe ressaltar o efeito da matéria orgânica na compressibilidade (Mazurana *et al.*, 2017), segundo Araujo-Junior *et al.* (2011) e Reichert *et al.* (2018) acontece pelo aumento na elasticidade, processo inicialmente descrito por Soane (1990), Ekwue e Stone (1995). Já para Suravi *et al.* (2021), a influência aparente do C no índice de compressão a relação ocorre, provavelmente, pelo efeito nas propriedades hidráulicas do solo e, não a quaisquer efeitos relacionados à estrutura. Os resultados, ao atestarem baixos conteúdos orgânicos (Tabela 1) porém compatíveis e característicos de solos da região do cerrado brasileiro (Sousa e Lobato, 2004; Marques *et al.*, 2004; Aquino *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2021) sugerem que os eventuais efeitos benéficos tanto em COT quanto em ISE tenham sido facilmente superados pela elevada suscetibilidade à compactação (Severiano *et al.*, 2013), pela alta trafegabilidade de solos em conteúdos inadequados de água, característica muito comum da agricultura de sequeiro brasileira (são duas ou três operações a cada safra, no caso das lavouras de sequeiro ou irrigadas, respectivamente e com todas as operações de manejo realizadas mecanicamente). Em concordância, Silva *et al.* (2021) demonstraram num Latossolo Vermelho Acriférico típico do cerrado brasileiro, com 450 g kg^{-1} de argila e 40 g kg^{-1} de matéria orgânica, que 85% do incremento da compactação do solo foi causado em apenas duas passadas de um trator, demonstrando a alta suscetibilidades destes solos.

Em adição, destaca-se aqui o importante papel da Macro na modelagem da compactação do solo, sendo o único atributo presente nos dois modelos testados na tabela 2 e, ainda acumulando o maior efeito direto na relação causal (aproximadamente 70% em $D_{srel_{argila}}$ e 95% em $D_{srel_{argila + silte}}$) e com os maiores coeficientes de correlação com D_{srel} ; os demais atributos acumularam, majoritariamente, efeitos indiretos. O papel da Macro é descrita tantos pelos altos coeficientes quanto as altas correlações com os demais atributos (Figura 5) e, assim, os resultados ressaltam o impacto do uso e manejo do solo nas alterações estruturais como consequências da reorganização das partículas e do espaço poroso, afetando inicial e fortemente a Macro e conferindo novo ambiente físico que desencadeia novos processos de intensidade (relacionados ao fluxo de gases e água) e de resistência da matriz sólida.

Este comportamento é reforçado pela razão de verossimilhança de modelos matemáticos ajustados a partir do modelo 2, sendo validado com dois atributos (modelo 3) ou mesmo somente em função da Macro (modelo 4), cuja capacidade preditiva destes é muito próxima, atestada pelo R^2 e pelo \sqrt{QMerro} (Tabela 3). Os resultados certificam a robustez da Macro na modelagem do processo de compactação do solo e encorajam, então, a propor um mecanismo de diagnose a partir de características e propriedades do solo, considerando valores referências relacionados a limítrofes do atributo em destaque.

4.3. Diagnose da compactação do solo

A composição do sistema de diagnose da compactação do solo levou em consideração as FPTs de Rezende *et al.* (2025) que estimam, a partir de atributos de fácil avaliação (textura e D_s), condições estruturais relacionadas à complexas mensurações físicas e que definem limites das funções edáficas governadas pela estrutura. O critério de julgamento foi baseado no solo em condições iniciais antes da ocorrência que qualquer compactação (D_{si}) e naquela em que a macroporosidade torna-se limitante (D_{sl}) a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Vomocil & Flocker, 1966; Severiano *et al.*, 2011a, b) pela robustez de atributo já discutida.

A utilização da D_s , por sua vez, é coerente por se tratar de um atributo representativo do arranjo das partículas sólidas e do espaço poroso, cujos procedimentos analíticos apresentam acuracidade e precisão, simplicidade na execução (Borges *et al.*, 2012; Severiano *et al.*, 2013) expressando grandeza intensiva em que tamanho da amostra não representa nenhum risco aos resultados. A determinação associada à textura do solo, e com base nestas funções, possibilita a comparação de solos distintos. É o que se observa nas comparações binomiais de atendimento dos critérios de julgamento (Figura 6) e, considerando a D_{sl} , os resultados de D_s apontam 98% de acuracidade e superioridade ao critério de D_{si} (p valor ***). Por sua vez, também há ganhos analíticos com base em argila + silte em relação à diagnose pela argila (97% vs 92%***) de modo que o julgamento das amostras de solo com base em $D_{si_{argila+silte}}$ teve 96% de acuracidade e $D_{sl_{argila+silte}}$ 99%, embora este último não tenha diferenciado de $D_{sl_{argila}}$. Visando a padronização de critérios para maior assertividade, foram considerados os resultados baseados somente nos conteúdos de argila + silte.

O intervalo de confiança (IC) a 95%, das FPTs foi utilizado na interpretação do estado de compactação do solo e com definição de quatro condições de interpretação (Figura 7), sendo:

- 1: Solo perturbado: quando o par ordenado " $D_s, \text{argila} + \text{silte}$ " é menor que o limite inferior do IC da FPT para D_{si} ($D_s < \text{LI-}D_{si}$, equivalente à área em verde da figura). Os baixos valores de D_s indicam a ocorrência de alguma perturbação recente (ex: revolvimento antecedente à amostragem), cujos valores são numericamente compatíveis ao solo sob condição natural; - 2: Sem compactação: quando $\text{LI-}D_s < "D_s, \text{argila} + \text{silte}" < \text{LI-}D_{sl}$ (área em amarelo), indicando a condição estrutural compatível ao bom manejo e com ausência de compactação do solo limitante, independentemente de ocorrer compactação benéfica ou não; - 3: compactação limitante: quando $\text{LI-}D_{sl} < "D_s, \text{argila} + \text{silte}" < \text{LI-}D_{sc}$ (limite inferior da densidade crítica ao intervalo hídrico ótimo), cuja compactação do solo reduz a macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, comprometendo as funções edáficas reguladas pela estrutura do solo, como trocas gasosas e recarga de água subterrânea, bem como o rendimento das culturas (área em laranja) e; e; - 4: Compactação severa: Quando " $D_s, \text{argila} + \text{silte}" > \text{LI-}D_{sc}$, cuja a densidade do solo atingiu valores maiores que os necessários para o crescimento das plantas e o rendimento com base no intervalo hídrico ótimo (área em vermelho).

Este comportamento reflete as colaborações de Severiano *et al.* (2011a) que, ao modelarem as alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado brasileiro, constataram que as propriedades hidrológicas são afetadas antes da compactação, torna-se restritiva ao crescimento e rendimento das culturas. Ademais, o intervalo de confiança da FPT de Rezende *et al.* (2025) expressa o incremento de D_s referente à densidade crítica do intervalo hídrico ótimo e, assim, a completa degradação física do solo. Em adição, é de esperar medidas mitigatórias mais simples ou eficientes em casos de compactação limitante em relação à compactação severa.

Com base nestes critérios, os resultados destacam a ocorrência de compactação do solo em 60% das fazendas avaliadas (27 fazendas das 45 totais; Figura 7 e Tabela 4. Na figura E do anexo, é mostrada a dispersão de todas as amostras em todas as fazendas avaliadas) e estando, majoritariamente abaixo da superfície do solo. Este é um comportamento comum em fazendas cultivadas sob sistemas conservacionistas de manejo, por causa da abertura de sulco para deposição das sementes mobilizar o solo na linha de plantio e romper a camada compactada nessa posição, comparativamente à entrelinha. É o que foi demonstrado por Ferreira *et al.* (2023) que, avaliando o potencial de mecanismos de semeadoras na superação da compactação superficial em solos sob plantio direto, demonstraram benefícios na camada de 0-0,10 m com maior eficácia pelo uso da haste sulcadora em relação aos discos duplos. Estima-se mobilização

de 25% do solo a cada plantio na referida camada, comumente com duas ou três operações a cada safra, no caso das lavouras de sequeiro ou irrigadas, respectivamente.

Associado ao impacto mecânico das semeadoras, há ainda de reconhecer o papel da ativação biológica do solo como promotor de estruturação do mesmo, seja por plantas de cobertura com ação descompactadora (Silva *et al.*, 2019; 2021; Lima *et al.*, 2023; 2025) ou ainda pelo estímulo ao desenvolvimento de atividade faunística, como demonstrado por Marchão *et al.* (2009) ao observarem aumento expressivo na seguinte ordem: pastagem contínua < lavoura contínua sob plantio direto < integração lavoura-pecuária = cerrado nativo, e com destaque para a alta densidade de Coleoptera, Formicidae, Myriapoda e Isoptera. Outros estudos mostram o papel das minhocas na formação de galerias e de agregados, bem como na distribuição do tamanho dos poros (Blanchart *et al.*, 1997; Barros *et al.*, 2001 e Bartz *et al.*, 2013).

A avaliação da compactação do solo em função das classes texturais considerou como indicativo a relação entre o tamanho das frações estabelecidas por Rezende *et al.* (2025) e apresentado no anexo (Figura D, anexo). Assim, e com base na extrapolação dos conteúdos de argila + silte (Tabela A; Anexo B), observa-se ausência de fazendas compactadas de texturas arenosa ou média, os primeiros indicativos de compactação limitante nas argilosas e sendo este um problema praticamente inevitável em fazendas muito argilosas (26 das 30 fazendas avaliadas nesta categoria). Os resultados corroboram às investigações de Severiano *et al.* (2013), que estudando a relação entre compactação e textura de Latossolos oxídicos da região do cerrado, encontraram que a baixíssima capacidade de suporte de carga torna-os mais suscetíveis do mundo, com deformações ocorrendo na estrutura mesmo quando trafegados sob condições de solo seco. Ademais, a melhor combinação de aeração e retenção de água, logo suscetibilidade ocorre tipicamente nos solos mais argilosos (Reynolds *et al.* (2009), enquanto aqueles com composição granulométrica predominantemente grossa são capazes de suportar pressões até mesmo superiores às aplicadas pelo maquinário sem que haja deformações elásticas significativas (Severiano *et al.*, 2011b).

Este problema também foi diagnosticado em todos os sistemas de manejo adotados e nos pedoambientes, embora estas classificações tenham caráter qualitativa (baseada na percepção dos fazendeiros). Assim, não é possível estabelecer relações analíticas de causas e efeitos entre a diagnose da compactação e a performance agrônômica e, por este motivo, os resultados serão utilizados no intuito de caracterização das áreas.

Em contraposição, o papel de sistemas conservacionistas na resiliência física do solo tem sido destacado na agricultura brasileira (Silva *et al.*, 2019; 2021; Ferreira *et al.*, 2023. Lima *et al.*, 2023; 2025) mas que, quando são realizadas as operações mecanizadas em conteúdos inadequados de água, há disseminação até as camadas supracitadas (Peixoto *et al.*, 2022). Faz-se necessário, então, cautela na constatação do potencial destes manejos na mitigação da degradação do solo, bem como de reiterar que a referida classificação não é necessariamente, baseada nas premissas técnicas do sistema de plantio direto ou de integração lavoura-pecuária. A diagnose aqui proposta, portanto, tem potencial de tornar uma ferramenta de monitoramento da saúde física e de planejamento de ações mitigadoras, e sugerem que de fato, a elevada suscetibilidade seja o fator que governa a compactação destes solo.

Por fim, constatou-se a ocorrência de compactação limitante ou severa em todos os pedoambientes de produção, levantando questões sobre o real potencial de comprometimento de rendimentos das culturas por impedimento mecânicos, já que literatura agropecuária tropical aponta riscos de redução de 15% até 80%, na primeira ou segunda safra (Peixoto *et al.*, 2019a; Silva *et al.*, 2021). Por outro lado, foi ressaltado o satisfatório rendimento até mesmo nas fazendas menos produtivas que, na maioria dos casos, ocorre por compensação, por outros fatores de produção, como abordado por Serafim *et al.* (2023). Neste sentido, Santos *et al.* (2005), estudando a compactação do solo na cultura do milho (a segunda cultura mais importante na agricultura de sequeiro brasileira e decisiva nas tomadas de decisões acerca do manejo do solo), constataram que altas doses de fósforo aplicadas funcionam como fator de alívio de impedimentos mecânicos às raízes e condiciona maiores produções em solos compactados. De modo semelhante, Beutler *et al.* (2004) constataram o mesmo efeito compensatório dos fertilizantes para a cultura da soja, alinhando com as observações de Lima *et al.* (2023) ao avaliarem aspectos físicos do solo, agronômicos e ambientais no cultivo da soja em pedoambientes corrigidos quimicamente e na mesma região estudada. Estes autores observaram que a compactação do solo não comprometeu o rendimento da lavoura, embora esta possa limitar os serviços ecossistêmicos notadamente relacionados a infiltração de água e recarga hídrica subterrânea (Severiano *et al.*, 2011a).

Isto por que, sendo um problema praticamente inevitável e cuja redução do diâmetro dos poros é determinante na regulação dos fluxos de água e gases no solo (Horn, 2003; Severiano *et al.*, 2013; Mentges *et al.*, 2016; Gubiani *et al.*, 2024) e, principalmente, quando se considera que o maior fluxo ocorre nos macroporos, espera-se forte alteração no funcionamento do sistema poroso quando submetido ao uso e mesmo quando definidos limites críticos,

fazendo-se necessário então um esforço coordenado para encontrarem estratégias de manejo que maximizem a produção e minimizem o impacto negativo ao ambiente. Práticas conservacionistas voltadas ao controle de possíveis escoamentos superficiais, a incorporação de espécies vegetais em sistemas de rotação de culturas com habilidade para o rompimento de camadas compactadas e potencialmente capazes de formarem bioporos que favorecem o fluxo preferencial de água no solo (Silva *et al.*, 2019; 2021; Lima *et al.*, 2023; 2025), devem ser consideradas medidas mitigadoras verdadeiramente compensatórias, não apenas ao rendimento mas a redução da macroporosidade, culminando em contribuições para a sustentabilidade agrícola e ambiental na região do Cerrado.

5. Conclusão

Nesta pesquisa, ao avaliar fazendas com pedoambientes de diferentes capacidades produtivas, constatou-se que a qualidade física é fortemente influenciada pela distribuição das partículas do solo quanto ao tamanho. Por este motivo é necessário isolar os efeitos dos impactos do uso e manejo da composição do solo, o que foi possível ao considerar a densidade relativa como a melhor, ou pelo menos a estimativa mais simples da compactação do solo, que relacionada aos indicadores estudados possibilita relações causais com atributos de natureza distintas, mas que se correlacionam. Assim, e por razão de verossimilhança foi atestada a robustez da macroporosidade na avaliação das densidades de referência e relativa de solos contrastantes, graças à função de pedotransferência e à condição de contorno para a argila mais silte. Isto por que os procedimentos analíticos padrão não dispersam completamente solos muito intemperizados e particularmente os mais argilosos, fazendo com que o pseudossilte seja uma fração presente e funcional na modelagem da compactação do solo. Pelos critérios de julgamento da relação densidade do solo e textura, foi possível diagnosticar a ocorrência da compactação com 99% de acuracidade. Esta esteve presente em todos os pedoambientes e em todos os sistemas de manejo avaliados, com maior ocorrência em camadas imediatamente abaixo da superfície. Se os solos de textura arenosa e média isto não é um problema, os argilosos e particularmente muito argilosos, é praticamente inevitável e demanda esforços pelos fazendeiros para a mitigação.

6. Referências

ARAÚJO-JUNIOR, C.F.; GUIMARÃES, P.T.G.; DIAS JUNIOR, M.S.; ALCÂNTARA, E.N.; MENDES, A.D.R. Changes in chemical properties of a latosol by weed management in coffee plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2207-2217, 2011.

AQUINO, A.M.; SILVA, R.F.; MERCANTE, F.M.; CORREIA, M.E.F.; GUIMARÃES, M. de F.; LAVELLE, P. Invertebrate soil macrofauna under different ground cover plants in the no-till system in the Cerrado. **European Journal of Soil Biology**, v.44, p.191-197, 2008.

ARAGÓN, A.; GARCIA, M. G.; FILGUEIRA, R. R.; PACHEPSKY, Y. A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: the relationship with organic carbon and water content. **Soil and Tillage Research**, v. 56, n. 3, p. 197-204, 2000.

BARBOSA, S.M.; CARDUCCI, C.E.; SERAFIM, M.E.; ZEVIANI, W.M.; ALBACH, B.; CASTRO, E.M.; OLIVEIRA, G.C. Using ultrasonic and microwave devices to dry and disperse soils with high Fe₂O₃ content from Brazil. **Geoderma Regional**, v. 26, e00419, 2021.

BARROS, E.; CURMI, P.; HALLAIRE, V.; CHAUVEL, A.; LAVELLE, P. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an Oxisol in the process of forest to pasture conversion. **Geoderma**, v.100, p. 193-213, 2001.

BARTZ, M.L.C.; PASINI, A.; BROWN, G.G. Earthworms as soil quality indicators in Brazilian no-tillage systems. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 39-48, 2013.

BENEDET, L.; SILVA, S.H.G.; MANCINI, M.; TEIXEIRA, A.F.S.; INDA, A.V., DEMATTE, J.A., CURI, N. Variation of properties of two contrasting Oxisols enhanced by pXRF and Vis-NIR. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, e103748, 2022.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agrícola**, v. 61, n.6, p. 626-631, 2004.

BLANCHART, E.; LAVELLE, P.; BRAUDEAU, E.; LE BISSONNAIS, Y.; VALENTIN, C. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. **Soil Biology Biochemistry**, v.29, p. 431-439, 1997.

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 123, p. 43-49, 2012.

BOTTA, G.F.; TOLÓN-BECERRA, A.; BIENVENIDO, F.; RIVERO, D.; LAUREDA, D.A.; EZQUERRA-CANALEJO, A.; CONTESSOTTO, E.E. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) harvest: Tractor and grain chaser traffic effects on soil compaction and crop yields. **Land Degradation & Development**, v. 29, 4252-4261, 2018.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the proctor test. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 605-614, 2006.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as function of silt content. **Ciência Rural**, v. 47, e20160762, 2017.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Changes in chemical soil characteristics and soybean response to lime and gypsum applications in a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275–286, 2003.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a rhodic ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158-164, 2009.

CECAGNO, D.; COSTA, S.E.V.G.A.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T.R.; MARTINS, A.P.; REICHERT, J.M.; GUBIANI, P.I.; BALERINI, F.; FINK, J.R.; CARVALHO, P.C.F. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v, 156, p. 54-62, 2016.

CHEN, G.; WEIL, R.R.; HILL, R.L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v, 136, p. 61-69, 2014.

Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2021/2022. Décimo segundo levantamento.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Morphological, micromorphological and hydro-physical characterization of soils with a nitic B horizon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.

EKWUE, E. I.; STONE, R. J. Organic Matter Effects on the Strength Properties of Compacted Agricultural Soils. **Transactions of the ASAE**, v. 38, p. 357-365, 1995.

FERREIRA, T.R.; BORGES, J.A.; PIRES, L.F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 74-84, 2015.

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

GIL, J.D.B., GARRETT, R.D., ROTZ, A., DAIIOGLOU, V., VALENTIM, J., PIRES, G.F., COSTA, M.H., LOPES, L., REIS, J.C., Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso, Brazil. Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 13, e064025, 2018.

GUBIANI, P.I.; SANTOS, V.P.; MULAZZANI, R.P.; SANCHES SUZUKI, L.E.A.; DRESCHER, M.S.; ZWIRTES, A.L.; MÜLLER, E. A relationship between plant-available water and soil compaction in Brazilian soils. **Sustainability**, v. 16, n. 16, p. 6951, 2024.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, V. 16, p. 105-120, 1990.

HORN, R.; KUTILEK, M. Editorial: the intensity-capacity concept-how far is it possible to predict intensity values with capacity parameters. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 1-3, 2009.

HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, n. 1/2, p. 77-88, 2003.

HUANG, Y.; TAO, B.; YANG, Y.; ZHU, X.; YANG, X.; GROVE, J.H.; REN, W. Simulating no-tillage effects on crop yield and greenhouse gas emissions in Kentucky corn and soybean cropping systems: 1980–2018. **Agricultural Systems**, v. 197, e103355, 2022.

JACOBS, A. A.; EVANS, R. S.; ALLISON, J. K.; GARNER, E. R.; KINGERY, W. L.; MCCULLEY, R. L. Cover crops and no-tillage reduce crop production costs and soil loss, compensating for lack of short-term soil quality improvement in a maize and soybean production system. **Soil and Tillage Research**, v. 218, e105310, 2022.

KELLER, T.; DÉFOSSEZ, P.; WEISSKOPF, P.; ARVIDSSON, J.; RICHARD, G. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 2, p. 391-411, 2007.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Strategies to improve the retention and availability of soil water. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.19, p. 21-29, 2015.

LAGACHERIE, P.; BARET, F.; FERET, J.B.; MADEIRA NETTO, J.; ROBBEZ-MASSON, J.M. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. **Remote Sensing of Environmental**, v. 112, n. 3, p. 825-835, 2008.

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

LIMA, J.; SILVA, J.F.G.; LINHARES, A.J.S.; COSTA, K.A.P.; FERREIRA, C.J.B.; SEVERIANO, E.C. Crop-livestock integration systems mitigate soil compaction and contribute to soybean yield. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 47, e69446, 2025.

LUCIANO, R.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M.T. Physical attributes related to soil compaction under native vegetation of Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319p.

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

MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determination of relative soil density through a pedotransfer function of maximum bulk density. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.

MARQUES, J.J.; SCHULZE, D.G.; CURI, N.; MERTTZMAN, S.A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 119, n. 3/4, p. 179-195, 2004.

MAYER, H., MENTLER, A., PAPAKYRIACOU, M., RAMPAZZO, N., MARXER, Y.; BLUM, W.E.H. Influence of vibration amplitude on the ultrasonic dispersion of soils. **International Agrophysics**, v. 16, p. 53-60, 2002.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; INDA JUNIOR, A.V.; CONTE, O.; BRESSANI, L.A.; MULLER, J. Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 60-71, 2017.

MCKENZIE, B.M.; DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 65, p. 23-28, 1996.

DE MELLO, D. C.; VELOSO, G. V.; DE MELLO, M. F.; DE LANA, M. G.; DE ANGELI OLIVEIRA, I.; DE OLIVEIRA MELLO, F. A.; DEMATTÊ, J. A. M. 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, 2025

MENDES, I.C; SOUSA, D.M.G.; REIS JUNIOR, F.B.; LOPES, A.A.C.; SOUZA, L.M. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. In: SEVERIANO, E.C.; MORAES, M.F.; PAULA, A.M. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo - Volume X**. 1ed.Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019, p. 399-462.

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

MOLIN, J. P.; TAVARES, T. R. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: Challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. **Engenharia Agrícola**, v. 39, p. 126-147, 2019.

NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. 4rd ed. New York, McGraw-Hill, 1408p, 1996.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; DE OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; DA SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104307, 2019a.

PEIXOTO, D.S.; SILVA, B.M.; SILVA, S.H.G.; KARLEN, D.L.; MOREIRA, S.G.; SILVA, A.A.P.; CURI, N. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1-14, 2019b.

PEIXOTO, D.S.; SILVA, L.C.M.; MELO, L.B.B.; AZEVEDO, R.P.; ARAÚJO, B.C.L.; CARVALHO, T.S.; MOREIRA, S.G.; CURI, N.; SILVA, B.M. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **science of the total environment**, v. 745, p. 140887, 2020.

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

PIERI, C.J.M.G. **Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah**. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1992.

REATTO, A.; BRUAND, A.; SILVA, E. M.; MARTINS, E. S.; BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosol of a regional toposequence across the Brazilian central plateau. **Geoderma**, v. 139, n. 1/2, p. 51-59, 2007.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian central plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, v. 76, n. 2, p. 122-134, 2009.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.; RODRIGUES, M.F.; CAVALLI, J.P.; AWE, G.O.; MENTGES, L.R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. **Catena**, v. 165, p. 345-357, 2018.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, p. 466-474, 2008.

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

REZENDE, A.G.; SOUZA, I.R.M; FONSECA, C.M.; DELMOND, J.G.; SILVA, E.A.; COSTA, K.A.P.; SEVERIANO, E.C. Structural changes in soils in the Brazilian Cerrado: Compaction modelling and pedotransfer functions of soils with contrasting textures. **Geoderma**, no prelo, 2025.

RIBEIRO, B.T.; LIMA, J.M.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N., SILVA, E.A.; SILVA, B.M. Ultrasonic aggregate breakdown of an Oxisol as affected by cavitation intensity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, p. 818-824, 2017.

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

SÁ, J.C.M.; SANTOS, J. B.; LAL, R.; MORAES, A.; TIVET, F.; SÁ, M.F.M.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A.O.; EURICH, G.; FARIAS, A.; FRIEDRICH, T. Soil specific inventories of landscape carbon and nitrogen stocks under no-till and native vegetation to estimate carbon offset in a subtropical ecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 2094-110, 2013.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J.M.; MELLO, C.R. Level of ultrasonic energy to study aggregate stability of a Latosol (Oxisol) under different uses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1649-1655, 2002.

SANTOS, G.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; FURTINI NETO, A.E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p. 740–752, 2005.

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

SCHAEFER, C.E.R.; GILKES, R.J.; FERNANDES, R.B.A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, v. 123, n. 1/2 p. 69-81, 2004.

SCHJØNNING, P.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; KELLER, T.; GREVE, M.H., LAMAND, M.; SIMOJOKI, A. Driver–pressure–state–impact–response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction: a European perspective. **Advances in Agronomy**, v. 133, p. 183-237, 2015.

SCHMIDT, M. W. I.; RUMPEL, C.; KOGEL-KNABNER, I. Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils. **European Journal of Soil Science**, v. 50, p. 87-94, 1999.

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. Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till Systems in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 862, p. 160674-11, 2023.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in latosols of the Cerrado region: I - Relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 773-782, 2011a.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: II - Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 783-791, 2011b.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N., COSTA, K.A.P.; CARDUCCI, C.E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, 51, 193-202. 2013.

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, J.F.G.; GONCALVES, W.G.; COSTA, K.A.P.; FLÁVIO NETO, J.; BRITO, M.F.; SILVA, F. C.; SEVERIANO, E.C. Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. **Semina. Ciências Agrárias**, v. 40, p. 2973-2990, 2019^a.

SILVA, E. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; MALLMANN, M.S.; PEREIRA, M.A.; PONS, S.S.; FOGGIATOM, W.S. Soil conservation management with cover crops, effects on critical energy levels, release and dispersion of aggregates. **Bragantia**, v. 78, p. 444-453, 2019b.

SILVA, S.H.G.; WEINDORF, D.C.; PINTO, L.C.; FARIA, W.M.; JUNIOR, F.W.A.; GOMIDE, L.R.; CURI, N. Soil texture prediction in tropical soils: A portable X-ray fluorescence spectrometry approach. **Geoderma**, v. 362, e114136, 2020.

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

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, A.B.; RAIMO, L.A.L.; MELLO, D.C.; GUIMARÃES, C.C.B.; URBINA-SALAZAR, D.F.; SILVA, S.H.G.; CURI, N.; DEMATTÊ, J.A.M. Surface reflectance and pXRF for assessing soil weathering indexes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, e103747, 2022.

TAUROZZI, J.S.L.; HACKLEY, V.A.; WIESNER, M.R. Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment-issues and recommendations. **Nanotoxicology**, v. 5, p. 711-729, 2010.

TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. **Manual of soil method analysis**. 3.ed. Rio de Janeiro. 2017. 573p.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Characterization of the least limiting water range of an oxisol under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

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

United States Department of Agriculture. Production, Supply and Distribution. Safra 2021/2022. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>>. Acesso em: 5 out. 2024.

E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Physical properties and organic carbon of an oxisol affected by different land use and soil management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2105-2114, 2011.

VITORINO, A.C.T.; FERREIRA, M.M.; CURI, N.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; MOTTA, P.E.F. Mineralogy, chemistry and stability of silt-size aggregates of soils from the Southeast Region of Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 133-141, 2003.

VOLLANT-TUDURI, N.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, M. I. L.; MARTINS, E. S. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v. 69, p. 1559-1564, 2005.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, v. 4, p. 242-246, 1966.

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

ZHANG, Y.; WANG, R.; WANG, S.; WANG, H.; XU, Z.; JIA, G.; LI, J. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system. **Field Crops Research**, v. 209, p. 151-158, 2017.

ZINN, Y. L.; CARDUCCI, C. E.; ARAUJO, M. A. Internal structure of a vermicular ironstone as determined by x-ray computed tomography scanning. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 345-349, 2015.

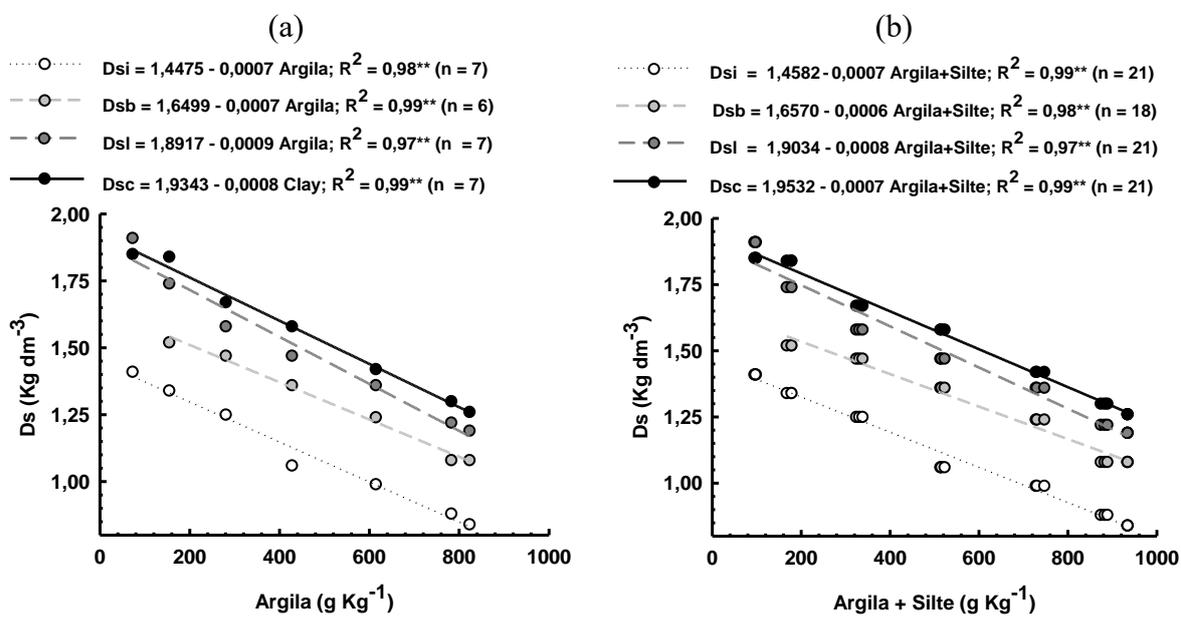
Anexo B

Figura A. Fotografias dos procedimentos de amostragens.



Figura B. Funções de pedotransferência para estimativa da densidade do solo inicial (D_{si}), benéfica em termos de aumento da retenção de água no solo (D_{sb}), limitante pela redução da macroporosidade em $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (D_{sl}) e crítica para o crescimento e rendimento das plantas com base no intervalo hídrico ótimo (D_{sc}), em função da argila total no solo extraída via dispersão ultrassônica (a) ou do conteúdo de argila + silte (b) em solos representativos do cerrado brasileiro.

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



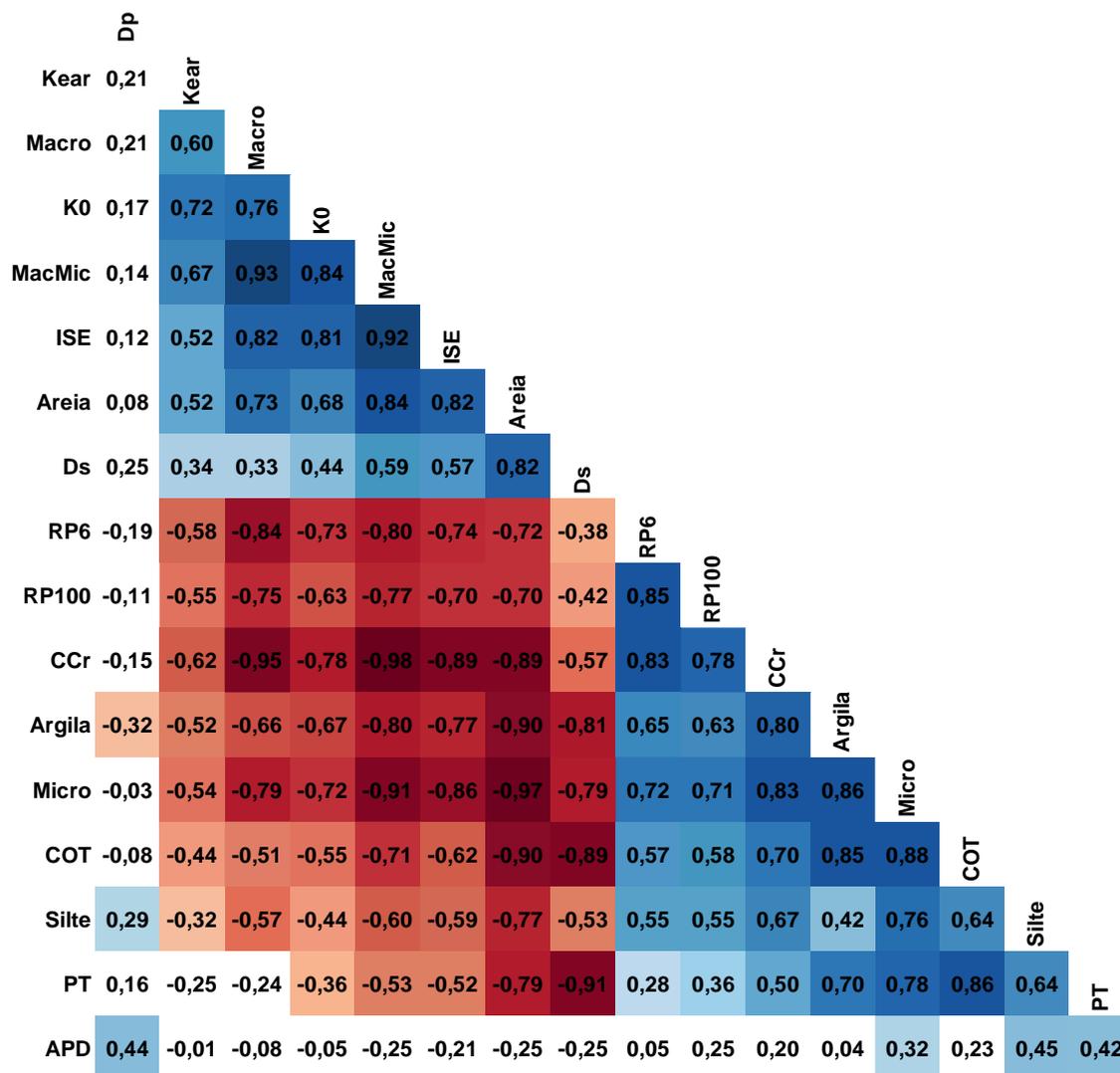


Figura C. Correlações entre os atributos de qualidade física de 17 variáveis avaliadas em fazendas de soja no cerrado brasileiro.

Areia: partículas de diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm (g kg^{-1}); Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm (g kg^{-1}); Argila: partículas < 0,002 mm (g kg^{-1}); K₀: condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Kear: permeabilidade específica do solo (μm^2); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); MacMic: relação macro:microporos (adimensional); RP6: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -6 kPa (MPa); RP100: resistência do solo à penetração ao potencial matricial de -100 kPa (MPa); APD: água prontamente disponível ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); CCr: capacidade de campo relativa (adimensional); COT: carbono orgânico total (g kg^{-1}); ISE: índice de estabilidade estrutural do solo (%).

Figura D. Relação entre argila total do solo e os conteúdos de argila + silte obtido via dispersão ultrassônica em solos representativos do cerrado brasileiro.

Fonte: Modificado de Rezende et al. (2025).

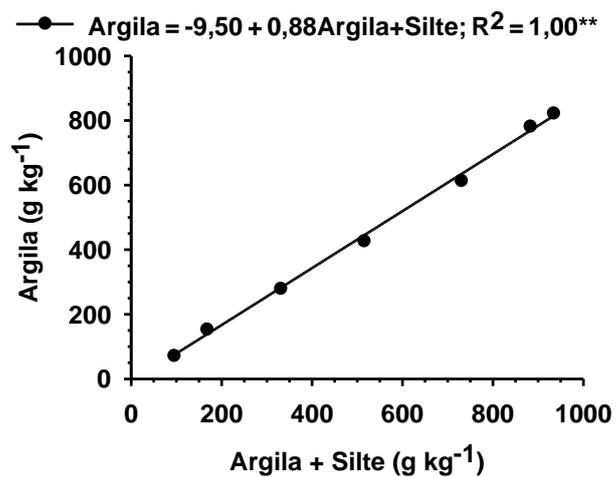
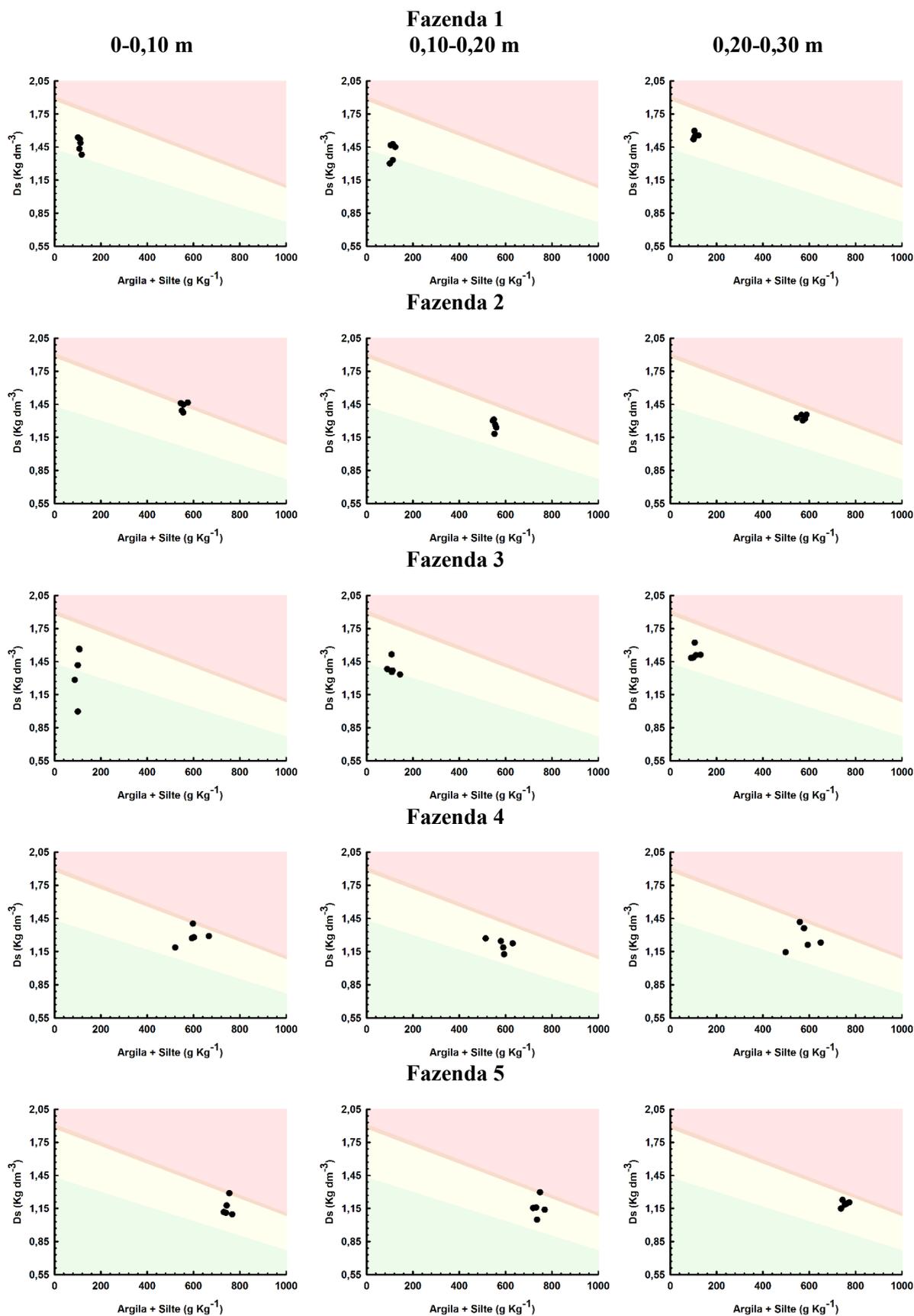
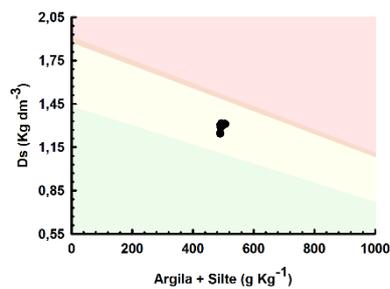
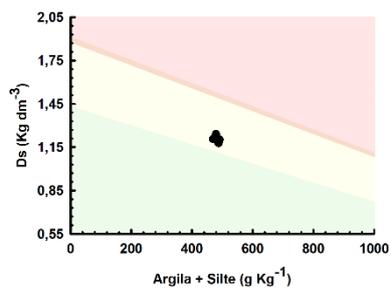
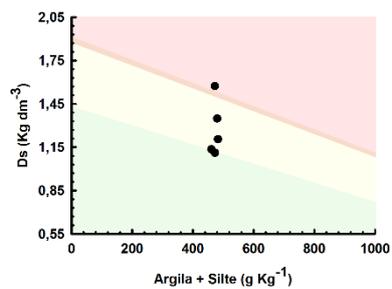


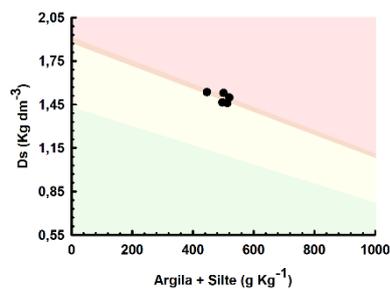
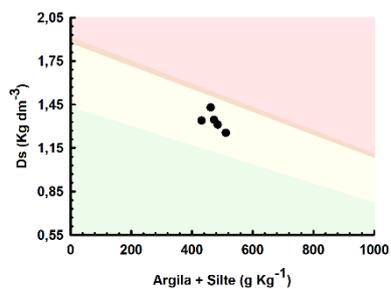
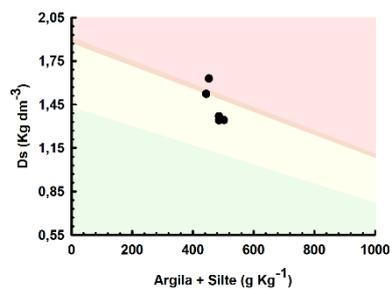
Figura E. Distribuição de todos os valores de densidade do solo em função do conteúdo de argila + silte em fazendas de soja no cerrado brasileiro.



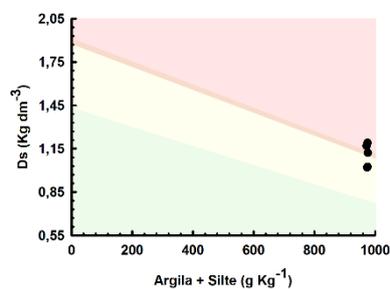
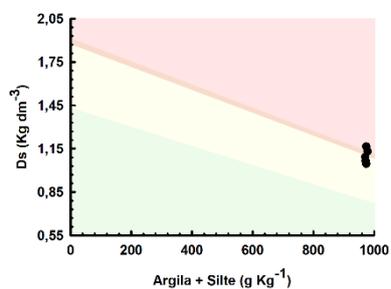
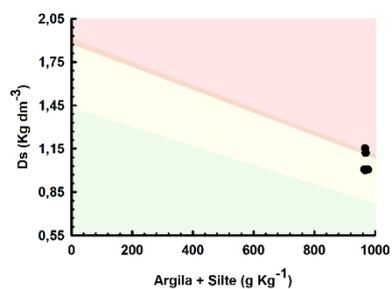
Fazenda 6



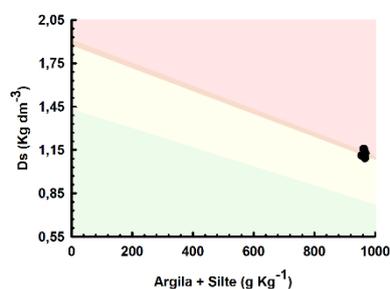
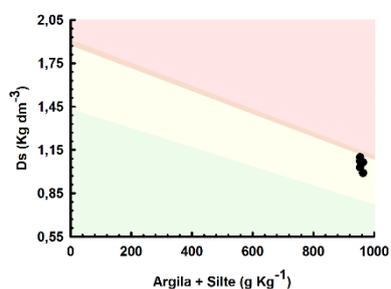
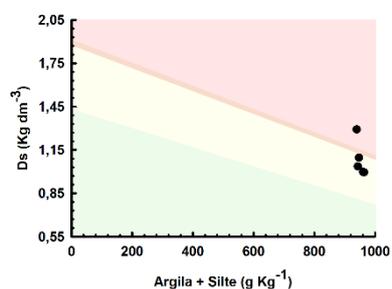
Fazenda 7



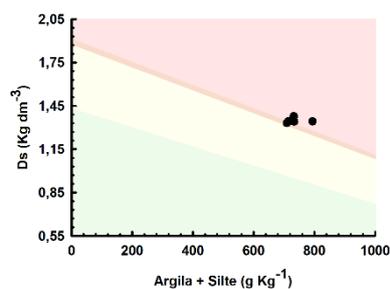
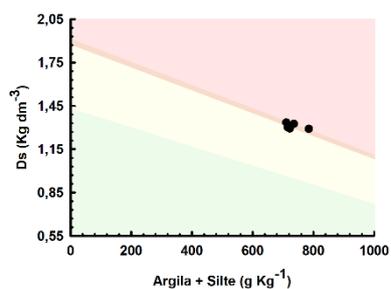
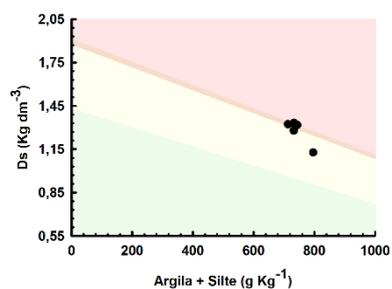
Fazenda 8



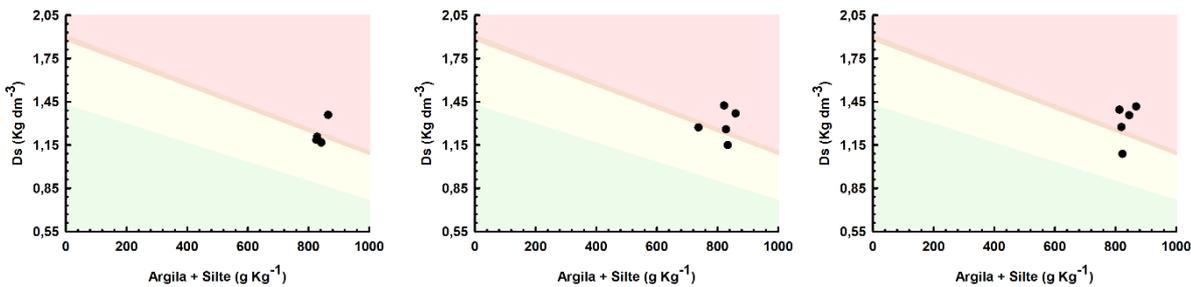
Fazenda 9



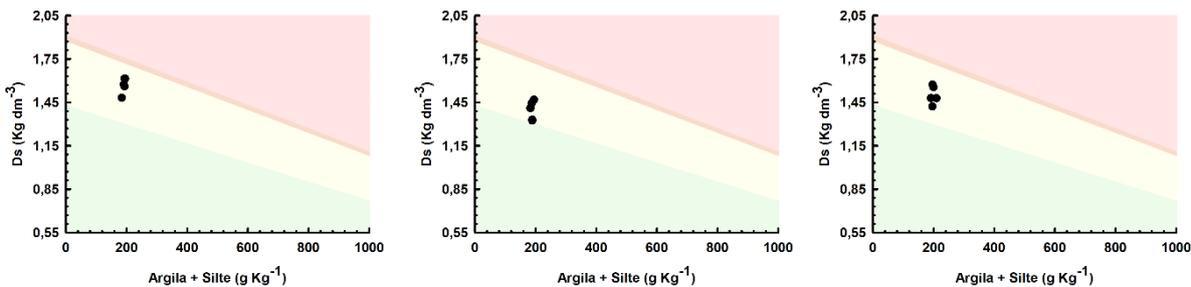
Fazenda 10



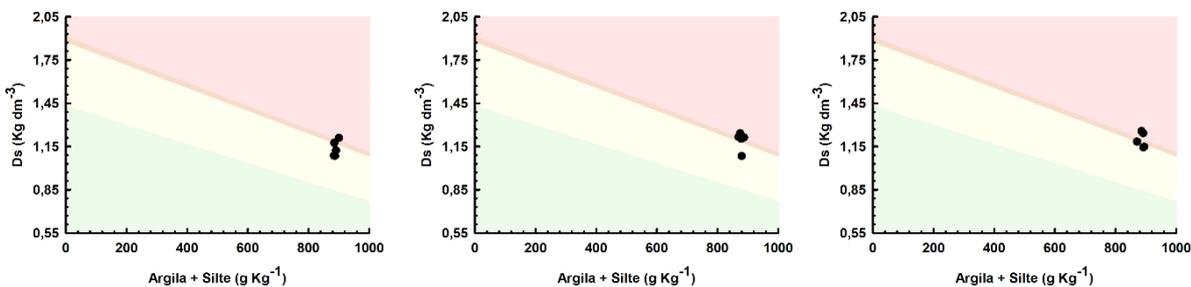
Fazenda 11



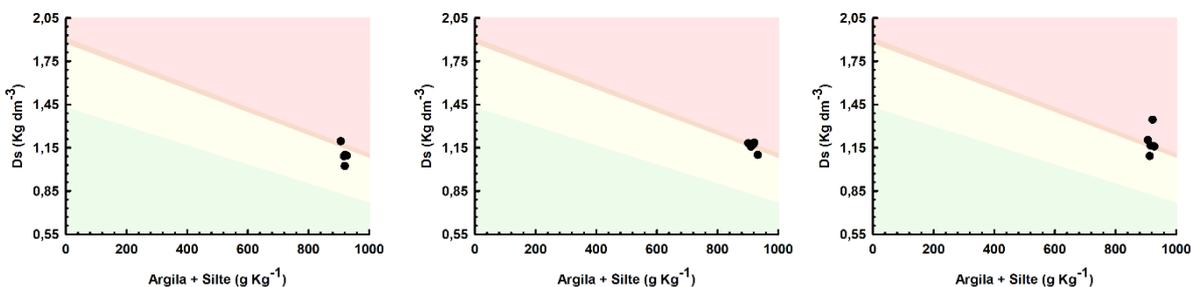
Fazenda 12



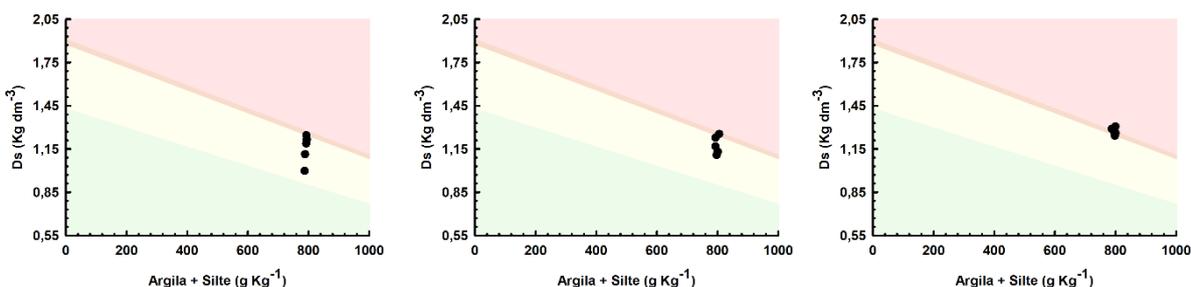
Fazenda 13



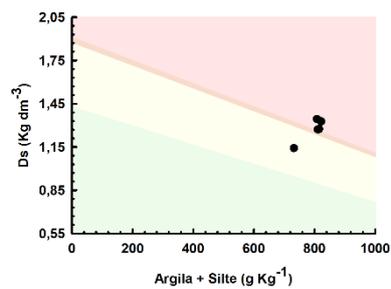
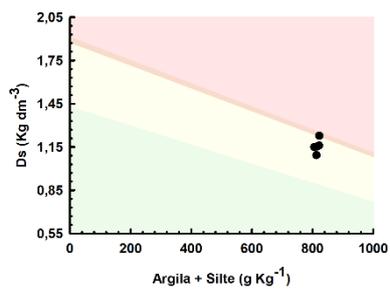
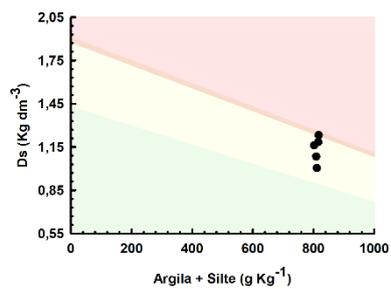
Fazenda 14



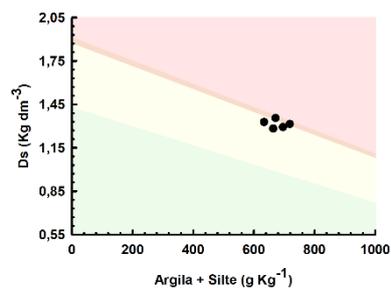
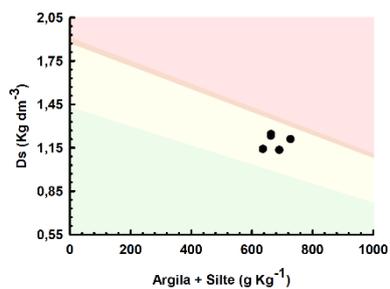
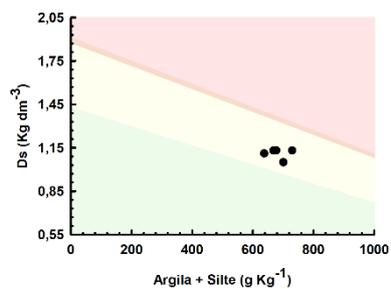
Fazenda 15



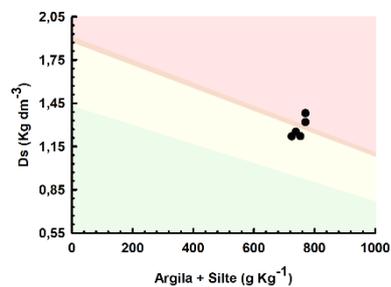
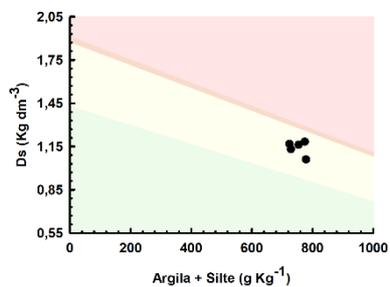
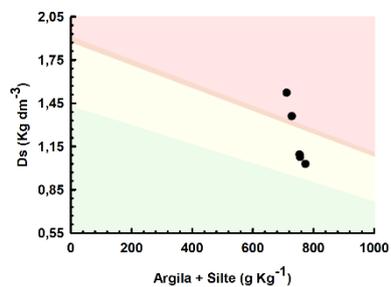
Fazenda 16



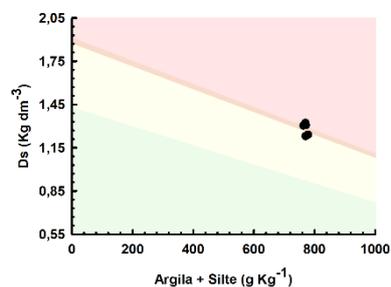
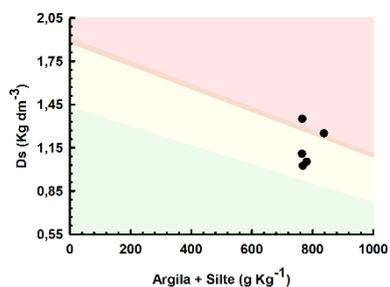
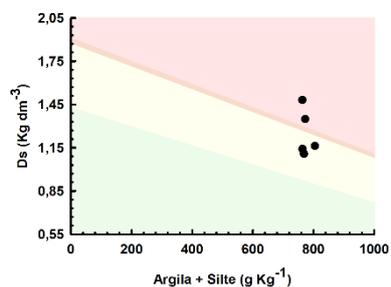
Fazenda 17



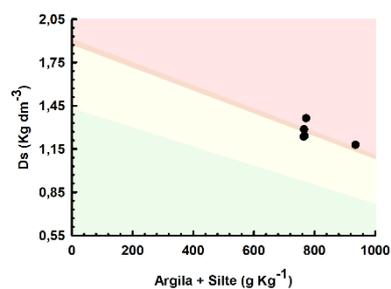
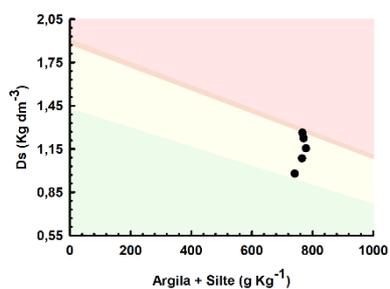
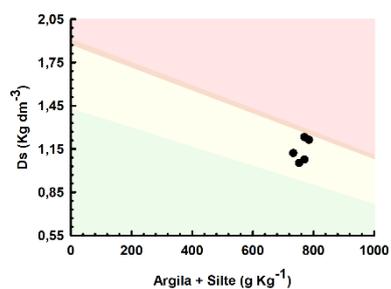
Fazenda 18



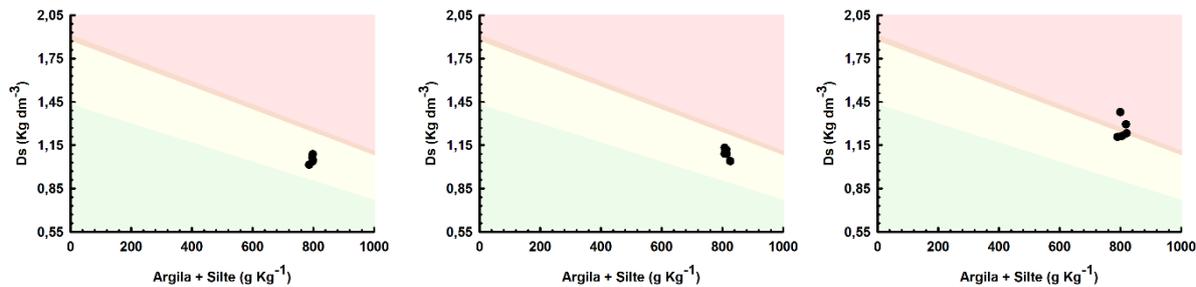
Fazenda 19



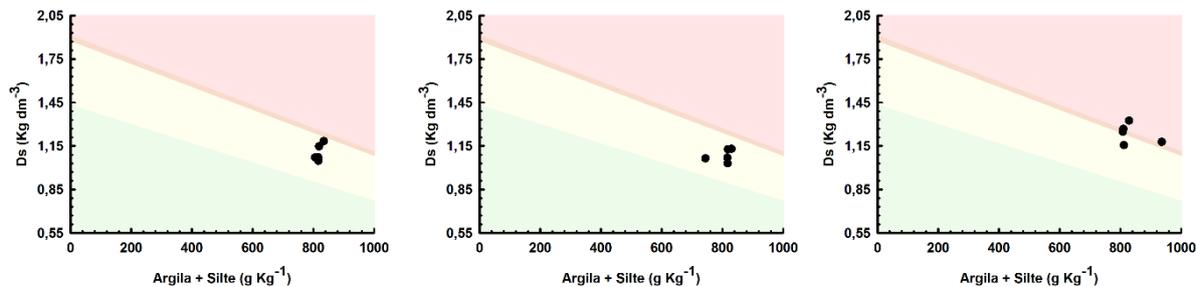
Fazenda 20



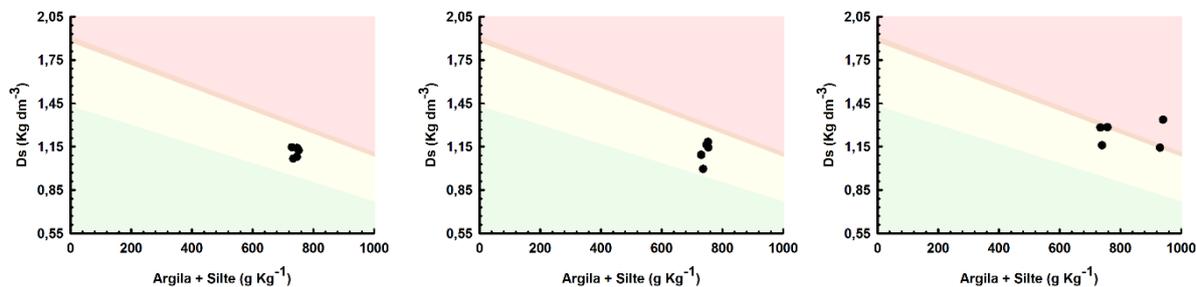
Fazenda 21



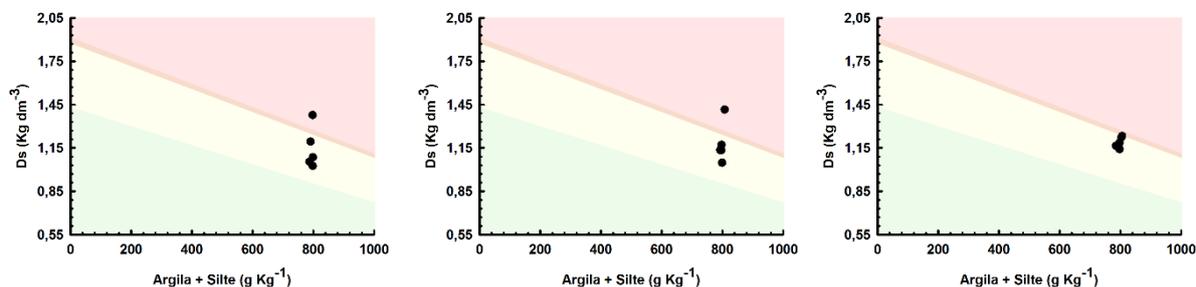
Fazenda 22



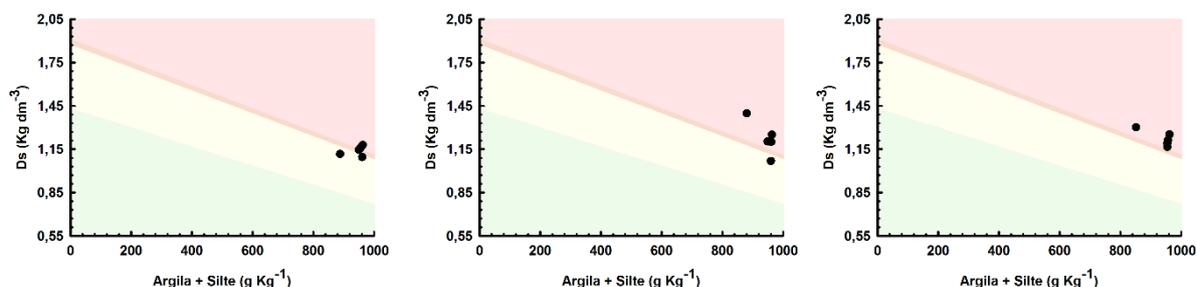
Fazenda 23



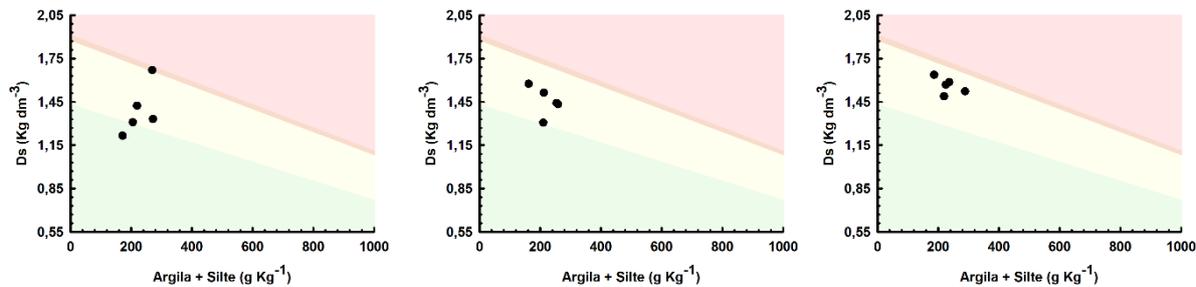
Fazenda 24



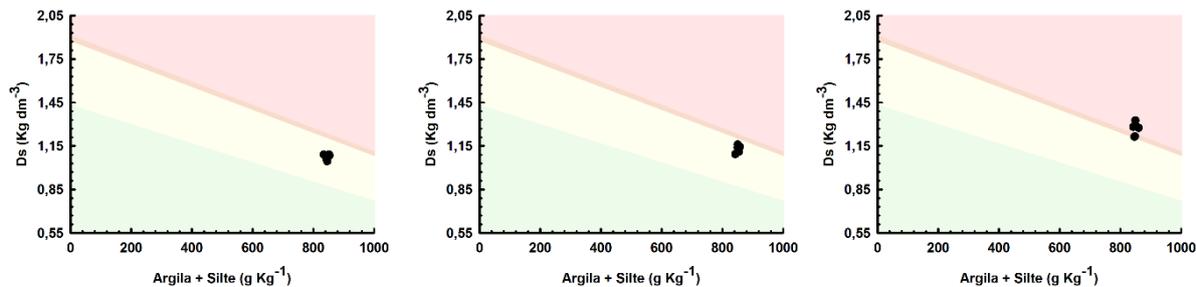
Fazenda 25



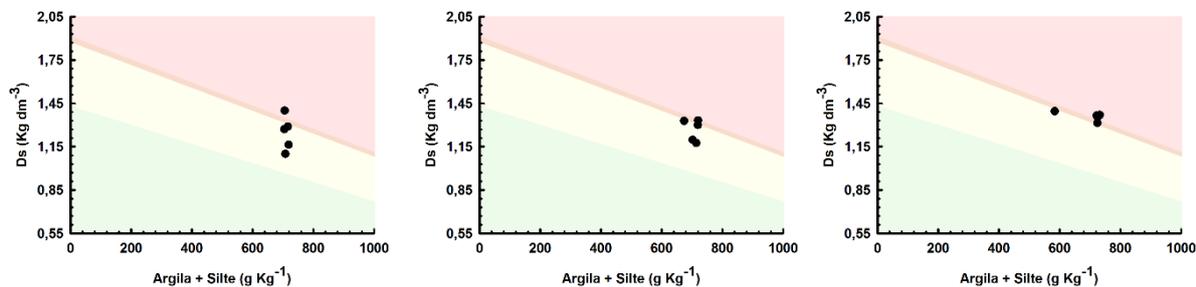
Fazenda 26



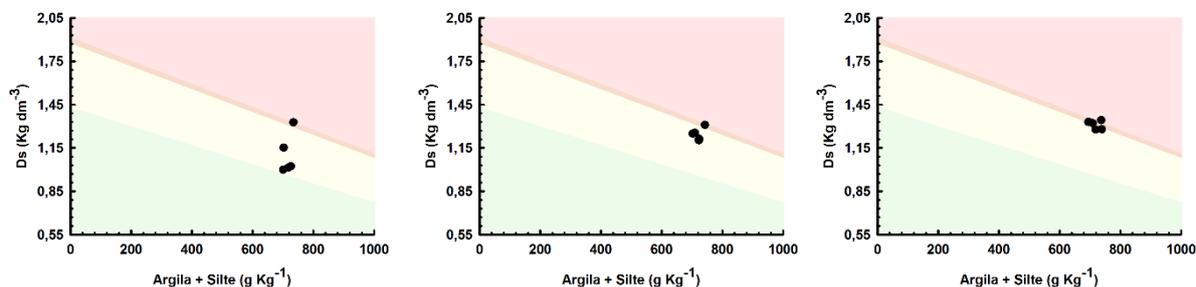
Fazenda 27



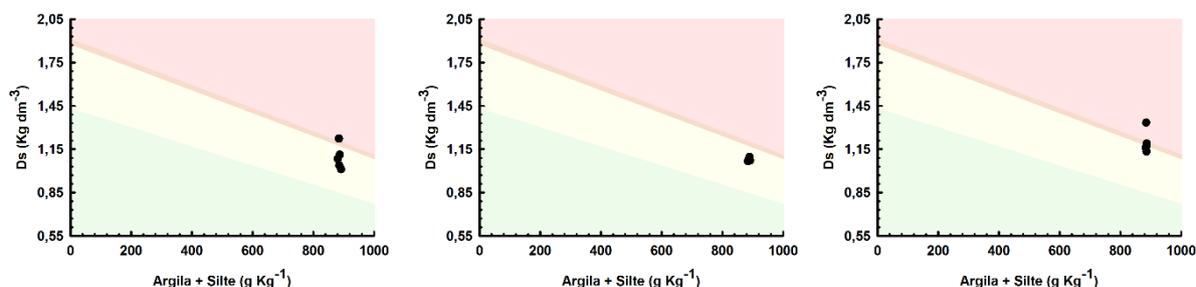
Fazenda 28



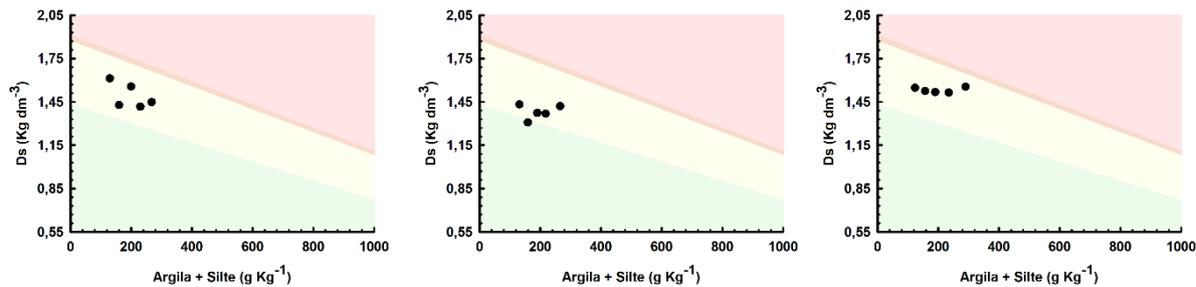
Fazenda 29



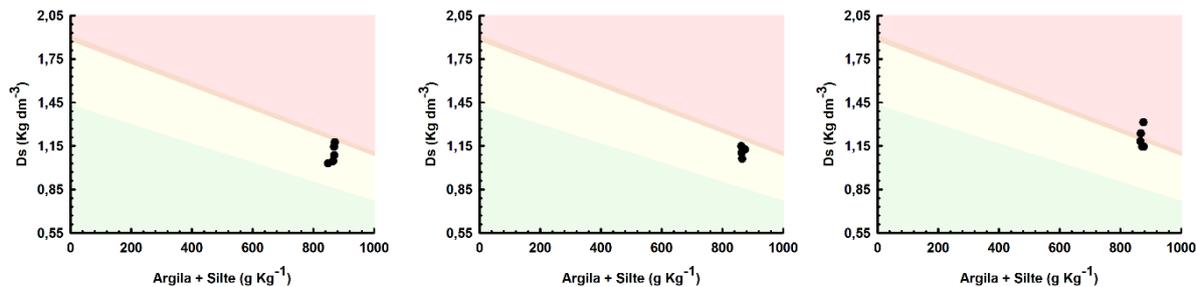
Fazenda 30



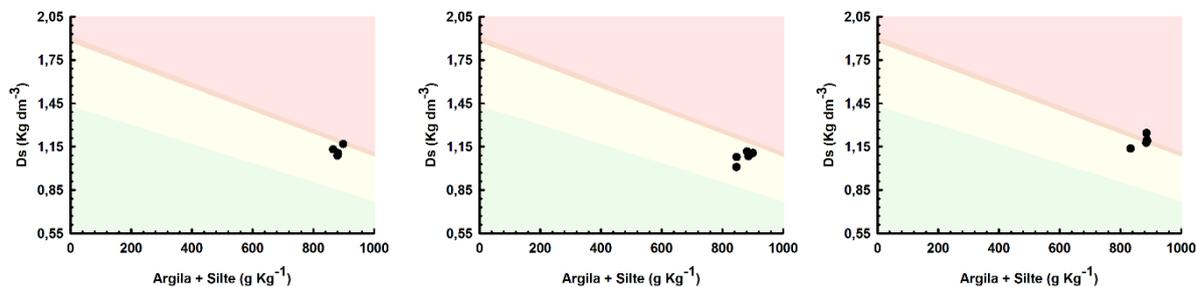
Fazenda 31



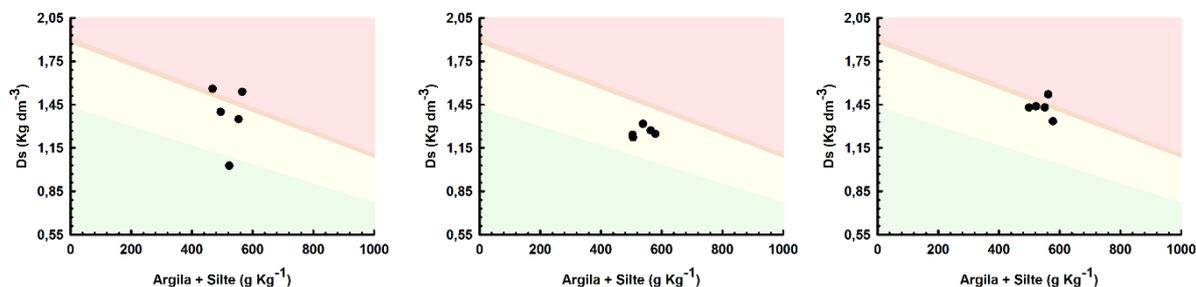
Fazenda 32



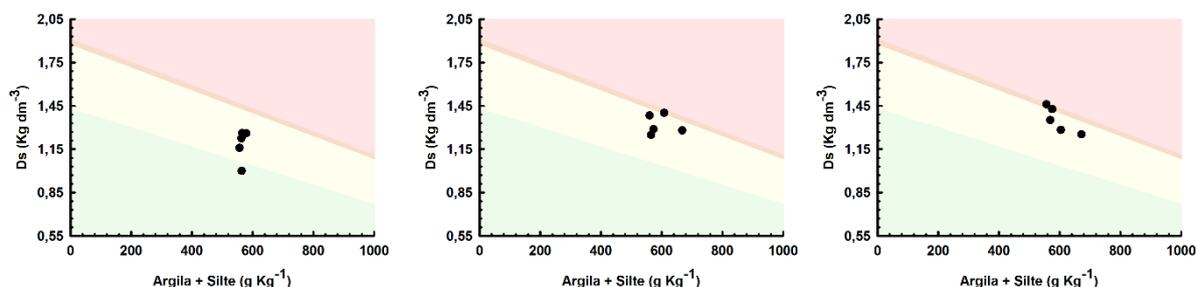
Fazenda 33



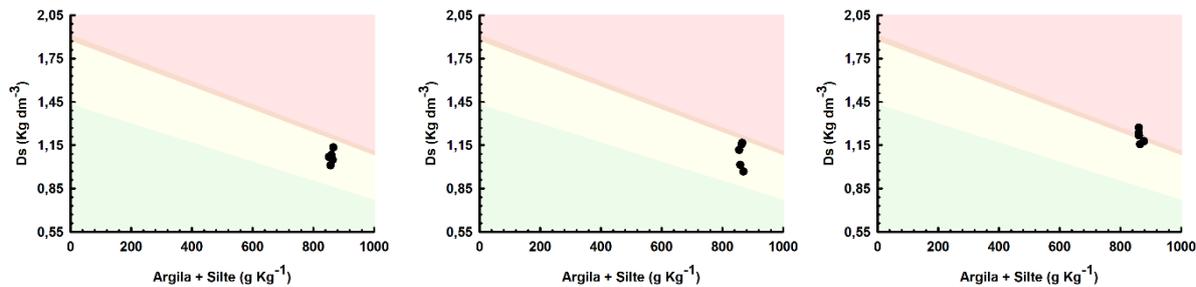
Fazenda 34



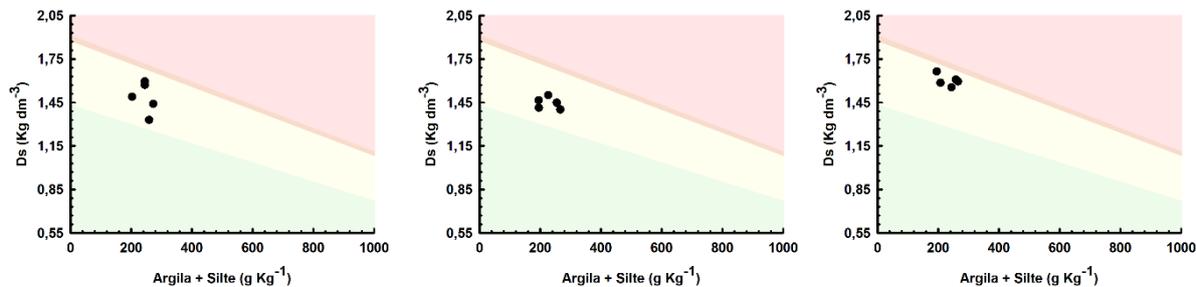
Fazenda 35



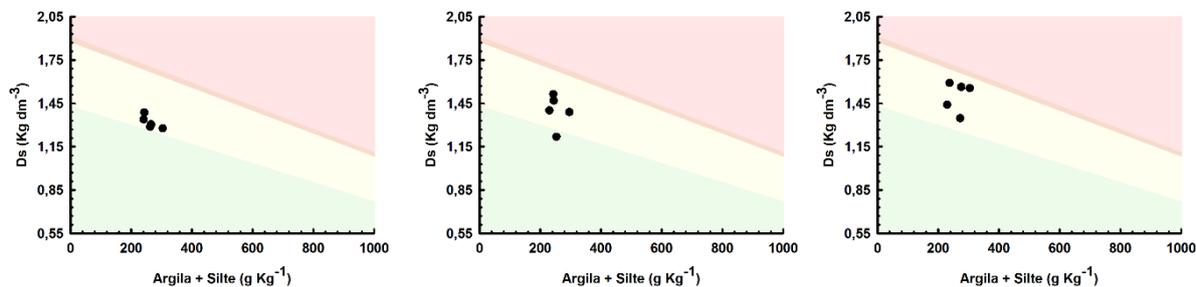
Fazenda 36



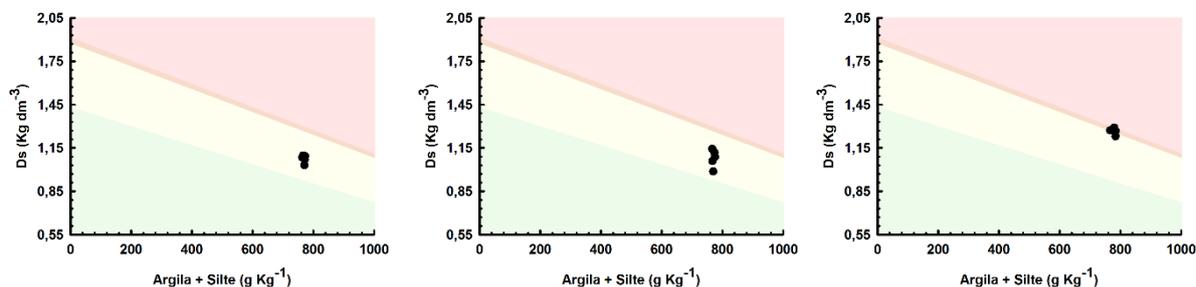
Fazenda 37



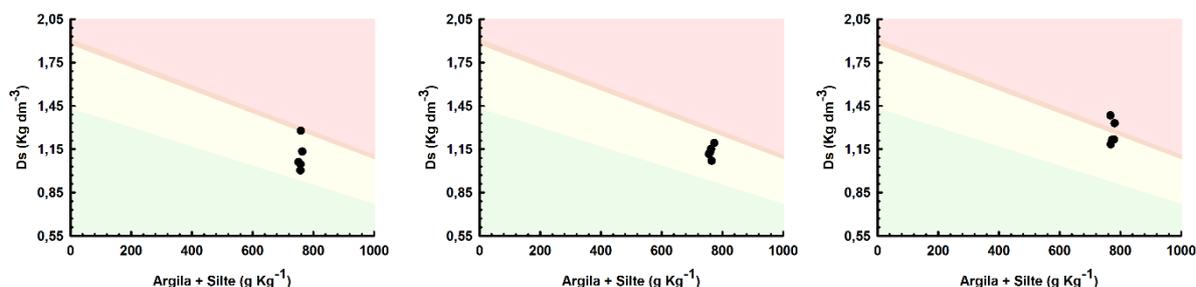
Fazenda 38



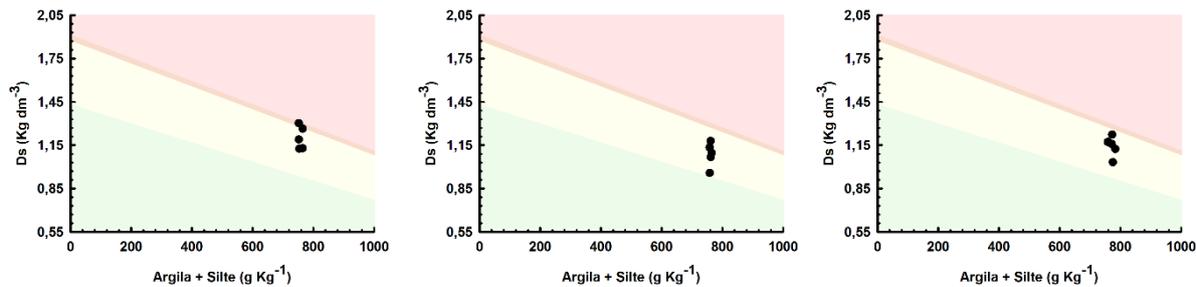
Fazenda 39



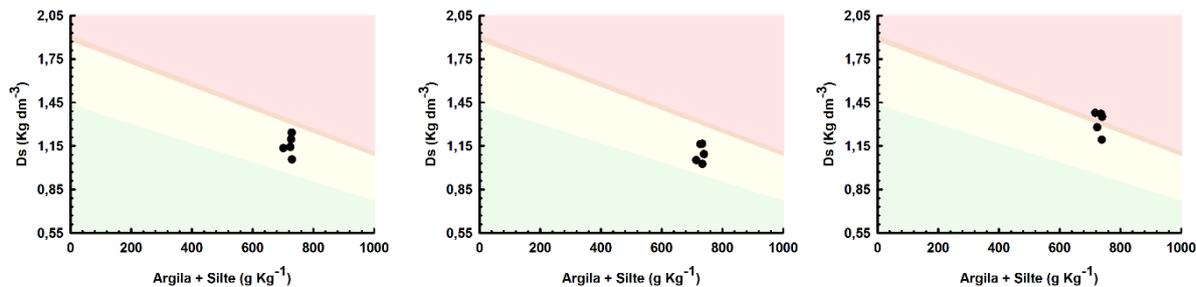
Fazenda 40



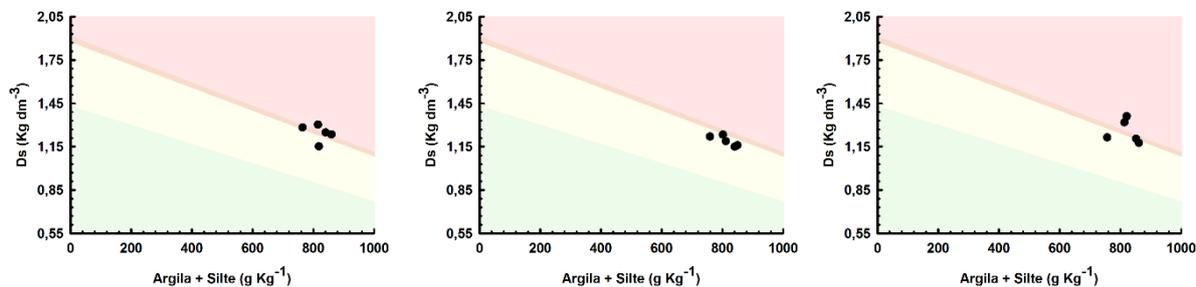
Fazenda 41



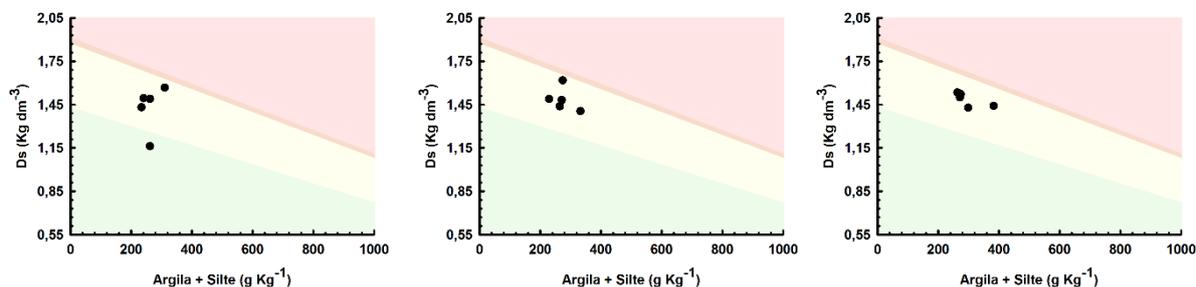
Fazenda 42



Fazenda 43



Fazenda 44



Fazenda 45

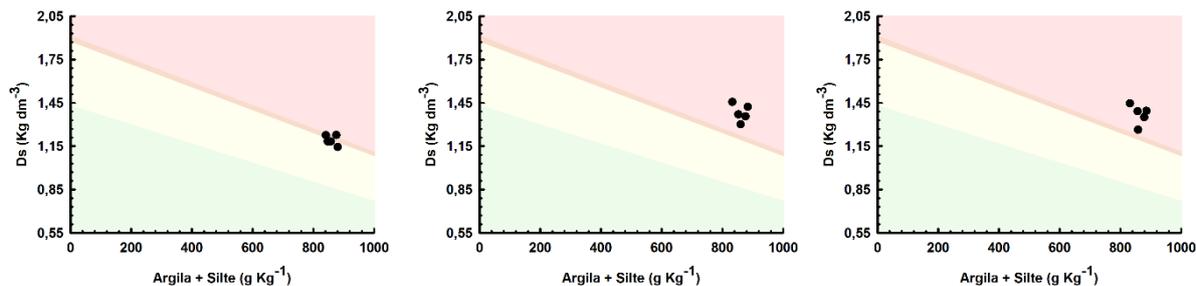


Tabela A. Relação entre o conteúdo de argila total do solo e os conteúdos de argila mais silte, para fins de interpretação das classes texturais de fazendas de soja do cerrado brasileiro¹.

Classe Textural	Conteúdo de argila	Conteúdo de argila + silte
Arenosa	< 149 g kg ⁻¹	< 180 g kg ⁻¹
Média	150 – 350 g kg ⁻¹	181 - 410 g kg ⁻¹
Argilosa	351-600 g kg ⁻¹	411-694 g kg ⁻¹
Muito Argilosa	> 600 g kg ⁻¹	> 695 g kg ⁻¹

¹: Determinadas conforme a figura D.

Tabela B. Atributos indicadores da qualidade física avaliados na pesquisa.

Atributo	Símbolo	Unidade	Método	Fonte
Densidade de partículas	<i>Dp</i>	kg dm ⁻³	Balão volumétrico	Vomocil, J.A., 1965. Porosity. In: Blake, C.A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Madison.
Distribuição de partículas quanto ao tamanho (textura)	<i>Areia</i>	g kg ⁻¹	Pipeta	Gee and Bauder, Gee, G. W., Bauder, J. W. 1986 Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods 2 nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI, pp 383–411.
	<i>Silte</i>			
	<i>Argila</i>			
Carbono orgânico total	<i>COT</i>	g kg ⁻¹	oxidação com o dicromato de potássio	WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science , v. 37, p. 29-38, 1934.
Condutividade hidráulica do solo saturado	<i>K0</i>	mm h ⁻¹	carga constante; equação de Darcy-Willians	Klute, A. Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Soil. In: Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling; American Society of Agronomy, Inc.: Madison, WI, USA, 1965; pp. 210–221
Microporosidade do solo	<i>Micro</i>	dm ³ dm ⁻³	conteúdo de água (θ) em $\psi_m = - 6$ kPa	OLIVEIRA, L. B. de. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agropecuária Brasileira , v. 3, p. 197-200, 1968.
Permeabilidade ao ar	<i>Kear</i>	μm	Pressão decrescente	MCKENZIE, B.M.; DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. Journal of Agricultural Engineering Research , v. 65, p. 23-28, 1996.

continua...

... continua

Resistência do solo à penetração	<i>RP</i>	MPa	Penetrômetro bancada: cone de 45° e 3,84mm de diâmetro, à 10mm min ⁻¹	TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo , v. 22, p. 573-581, 1998.
Densidade do solo	<i>Ds</i>	kg dm ⁻³	Anel volumétrico	BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis . 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986a. p. 363-375. (Agronomy monograph, 9).
Porosidade Total	<i>PT</i>	dm ³ dm ⁻³	Volume não ocupado por sólidos, calculada a parte de Ds e Dp	KIEHL, E.J. Manual de edafologia: Relações solo-planta . São Paulo-SP, Ceres, 262p, 1979.
Macroporosidade do solo	<i>Macro</i>	dm ³ dm ⁻³	Porosidade de aeração em ψ_m = - 6 kPa	OLIVEIRA, L. B. de. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agropecuária Brasileira , v. 3, p. 197-200, 1968.
Relação macro:microporos	<i>MacMic</i>	adimensional		KIEHL, E.J. Manual de edafologia: Relações solo-planta . São Paulo-SP, Ceres, 262p, 1979.
Água prontamente disponível	<i>APD</i>	dm ³ dm ⁻³	Água retida entre (ψ_m) - 6 kPa e - 100 kPa	VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. Soil Science , v. 68, p. 75-94, 1949.
Capacidade de campo relativa	<i>CCr</i>	adimensional	Relação entre capacidade de campo e a saturação do solo	REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. Geoderma , v. 146, p. 466-474, 2008.
Índice de estabilidade estruturais	<i>ISE</i>	adimensional	Relação entre matéria orgânica e argila + silte	Pieri, C.J.M.G. Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah . Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1992.

Tabela C. Locais de amostragem e breves descrições de lavouras do sudoeste do estado de Goiás, na safra 2021/2022.

Área	Município	Latitude	Longitude	Altitude	Textura	Tempo de cultivo (anos)	Sistema de Manejo	Produtividade média	Produtividade	Ambiente
1	Montes Claros	-15°59'9.29"	-51°20'0.43"	362	Areia franca	19 anos	Plantio Direto	46±2,2	46	Baixa
2	São João da Paraúna	-16°45'28.07"	-50°21'59.16"	664	Argilo arenoso	5 anos	Plantio Direto	64±2,6	64	Baixa
3	Paraúna	-16°58'46.25"	-50°25'35.48"	675	Areia franca	20 anos	Plantio Direto	64±2,7	64	Baixa
4	Caiapônia	-16°45'32.07"	-51°43'49.55"	669	Franco argiloso	10 anos	Plantio Direto	74 ±0,8	74	Alta
5	Caiapônia	-17°16'35.06"	-51°40'50.47"	1005	Argila	40 anos	Plantio Direto	74 ±1,2	74	Alta
6	Indiara	-17° 4'44.54"	-50° 0'20.73"	541	Argilo arenosa	30 anos	Lavoura Irrigada	69±1,3	69	Intermediária
7	Indiara	-17° 5'40.06"	-49°58'50.57"	536	Franco argiloso arenoso	30 anos	Lavoura Irrigada	69±1,3	69	Intermediária
8	Acreúna	-17°13'39.87"	-50°23'48.51"	653	Argilo siltosa	30 anos	Plantio Direto	78	78	Alta
9	Acreúna	-17°13'51.05"	-50°23'19.57"	677	Argilo siltosa	30 anos	Lavoura Irrigada	85	85	Alta
10	Montividiu	-17°16'4.60"	-51°14'23.32"	894	Muito argilosa	36 anos	Plantio Direto	70±0,4	70	Intermediária
11	Montividiu	-17°18'25.17"	-51°21'40.57"	881	Argila	22 anos	Plantio Direto	72±2,6	72	Alta
12	Montividiu	-17°20'8.59"	-51°28'56.73"	934	Franco arenoso	40 anos	Integração Lavoura-Pecuária	81±2,2	81	Alta
13	Montividiu	-17°21'5.98"	-51°21'36.68"	831	Argilo siltosa	25 anos	Plantio Direto	57±1,4	57	Baixa
14	Montividiu	-17°21'20.57"	-51°25'0.10"	894	Argila	25 anos	Integração Lavoura-Pecuária	54±0,7	54	Baixa
15	Montividiu	-17°21'45.41"	-51°29'24.03"	964	Muito argilosa	40 anos	Integração Lavoura-Pecuária	81±1,9	81	Alta
16	Montividiu	-17°23'0.91"	-51°25'48.38"	951	Muito argilosa	30 anos	Integração Lavoura-Pecuária	68	68	Intermediária
17	Montividiu	-17°24'50.53"	-51°25'35.75"	897	Argila	30 anos	Lavoura Irrigada	75	75	Alta
18	Montividiu	-17°27'54.91"	-51°24'12.07"	928	Argila	37 anos	Plantio Direto	64±0,4	64	Baixa
19	Montividiu	-17°30'1.92"	-51°17'3.19"	903	Argila	33 anos	Plantio Direto	65±2,3	65	Intermediária
20	Montividiu	-17°30'3.88"	-51°16'27.91"	903	Argila	33 anos	Plantio Direto	68±1,7	68	Intermediária
21	Montividiu	-17°30'30.56"	-51°29'53.25"	930	Muito argilosa	37 anos	Plantio Direto	59±1	59	Baixa
22	Montividiu	-17°30'39.98"	-51°12'21.87"	899	Muito argilosa	25 anos	Plantio Direto	87±2,7	87	Alta
23	Montividiu	-17°31'4.85"	-51°12'8.02"	908	Muito argilosa	15 anos	Plantio Direto	80±3,6	80	Alta
24	Montividiu	-17°33'55.28"	-51°16'20.99"	897	Muito argilosa	20 anos	Plantio Direto	66±3,7	66	Intermediária
25	Joviânia	-17°53'16.63"	-49°47'42.95"	656	Franco argilo siltosa	50 anos	Lavoura Irrigada	101±2,4	101	Alta
26	Mineiros	-17°54'3.68"	-53° 4'51.26"	853	Franco arenosa	18 anos	Integração Lavoura-Pecuária	70±1,4	70	Intermediária

continua...

...continua

27	Mineiros	-17°50'48.59"	-53° 0'56.90"	892	Muito argilosa	6 anos	Plantio Direto	85±2,4	85	Alta
28	Pontalina	-17°28'19.81"	-49°22'4.87"	661	Argila	10 anos	Integração Lavoura-Pecuária	68±1,9	68	Intermediária
29	Rio Verde	-17°25'1.91"	-51°38'11.91"	986	Argila	30 anos	Plantio Direto	75±3,7	75	Alta
30	Rio Verde	-17°28'21.84"	-51°27'33.86"	918	Muito argilosa	20 anos	Plantio Direto	65±3,7	65	Intermediária
31	Rio Verde	-17°30'25.67"	-51°34'37.31"	964	Franco arenoso	30 anos	Plantio Direto	62	62	Baixa
32	Rio Verde	-17°30'34.05"	-51°38'18.21"	926	Muito argilosa	30 anos	Plantio Direto	68	68	Intermediária
33	Rio Verde	-17°40'30.48"	-50°49'9.83"	720	Argila	35 anos	Plantio Direto	69±1,6	69	Intermediária
34	Rio Verde	-17°47'12.73"	-51°12'59.12"	828	Argilo arenosa	30 anos	Integração Lavoura-Pecuária	52±2	52	Baixa
35	Rio Verde	-17°49'17.56"	-50°56'38.74"	745	Argila	25 anos	Plantio Direto	66±0,4	66	Intermediária
36	Rio Verde	-17°49'18.99"	-51°11'58.96"	866	Muito argilosa	30 anos	Plantio Direto	57±2	57	Baixa
37	Rio Verde	-17°51'34.23"	-51° 5'38.33"	800	Franco arenoso	15 anos	Plantio Direto	62±2	62	Baixa
38	Rio Verde	-17°56'55.28"	-50°58'49.71"	719	Franco argiloso arenoso	20 anos	Plantio Direto	64±2,1	64	Baixa
39	Rio Verde	-18° 4'5.53"	-50°47'12.64"	867	Argila	15 anos	Lavoura Irrigada	64±1,1	64	Baixa
40	Rio Verde	-18° 4'15.05"	-50°47'14.87"	867	Argila	15 anos	Plantio Direto	64±1,1	64	Baixa
41	Rio Verde	-18° 4'18.50"	-50°51'16.22"	854	Argila	2 anos	Plantio Direto	65±1,2	65	Intermediária
42	Jataí	-17°49'59.96"	-51°30'10.12"	852	Argila	30 anos	Plantio Direto	72±1,8	72	Alta
43	Jataí	-17°58'57.97"	-51°50'28.42"	812	Argila	10 anos	Integração Lavoura-Pecuária	100	100	Alta
44	Jataí	-18° 7'11.62"	-51°46'20.28"	766	Franco argiloso arenoso	20 anos	Plantio Direto	65±1,5	65	Intermediária
45	Castelândia	-18° 4'39.78"	-50°10'55.72"	449	Argila	30 anos	Integração Lavoura-Pecuária	55±3	55	Baixa

Conclusão Geral

1. P-IQS identifica as desordens de manejo e do perfil agronômico do solo;
2. 9 indicadores avaliados foram precisos;
3. Outros atributos - sem alterar a aplicabilidade do conceito proposto;
4. Os resultados apontam alta variabilidade em todos os índices avaliados (IQ-atributos, AEs e P-IQS) dada a heterogeneidade natural dos solos em interação às práticas adotadas;
5. A matéria orgânica do solo está majoritariamente associada às camadas superficiais, sendo oportuna e necessária a estocagem ao longo do perfil;
6. Os problemas de ordem física geralmente associados à compactação do solo foram as maiores limitações agronômicas que comprometem a sustentabilidade agropecuária das fazendas.
7. Pedoambientes de diferentes capacidades produtivas - qualidade física é fortemente influenciada pela distribuição das partículas do solo quanto ao tamanho;
8. Isolando os efeitos dos impactos do uso e manejo da composição do solo - densidade relativa como a melhor, ou pelo menos a estimativa mais simples da compactação do solo;
9. Foi atestada a robustez da macroporosidade na avaliação das densidades de referência e relativa de solos contrastantes - função de pedotransferência - argila mais silte;
10. Pelos critérios de julgamento da relação densidade do solo e textura - ocorrência da compactação com 99% de acuracidade, que esteve presente em todos os pedoambientes e em todos os sistemas de manejo avaliados, com maior ocorrência em camadas imediatamente abaixo da superfície, sendo os muito argilosos praticamente inevitável, sendo necessário esforços pelos fazendeiros para a mitigação.