

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

DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO: ABORDAGENS
METODOLÓGICAS NA PENETROMETRIA E TEXTURA

Autor: Me. Ítalo Rômulo Mendes de Souza
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

RIO VERDE – GO

Fevereiro - 2026

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

DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO: ABORDAGENS
METODOLÓGICAS NA PENETROMETRIA E TEXTURA

Autor: Me. Ítalo Rômulo Mendes de Souza
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

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

Rio Verde – GO

Fevereiro de 2026

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

S729 Mendes de Souza, Ítalo Rômulo
DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO:
ABORDAGENS METODOLÓGICAS NA PENETROMETRIA
E TEXTURA / Ítalo Rômulo Mendes de Souza. Rio Verde 2026.

91f. il.

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

1. Compactação. 2. Funções de pedotransferência. 3. Textura. 4.
Penetrometria. 5. Solos tropicais. I. Título.



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

Documentos 38/2026 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO: ABORDAGENS METODOLÓGICAS NA PENETROMETRIA E TEXTURA

Autor: Ítalo Rômulo Mendes de Souza

Orientador: Dr. Eduardo da Costa Severiano

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

APROVADA em 27 de fevereiro de 2026.

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (Presidente)

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

Prof. Dr. Alexandre Garcia Rezende (Avaliador interno)

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

Prof. Dr. Piero Iori (Avaliador externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Eduardo da Costa Severiano**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 28/02/2026 18:51:33.
- **Katia Aparecida de Pinho Costa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 28/02/2026 18:53:41.
- **Piero Iori**, Piero Iori - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Jatai (35840659000130) , em 28/02/2026 19:06:47.
- **Camila Jorge Bernabé Ferreira**, Camila Jorge Bernabé Ferreira - Professor Avaliador de Banca - Universidade de Rio Verde (01815216000178), em 28/02/2026 22:13:28.
- **Alexandre Garcia Rezende**, Alexandre Garcia Rezende - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 06/03/2026 08:47:10.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/02/2026. 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: 794238

Código de Autenticação: d02a958b4c



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder vida, saúde, força e discernimento ao longo de toda essa caminhada. Nos momentos de dúvida, desânimo e cansaço, foi na fé que encontrei serenidade para seguir, transformar dificuldades em aprendizado, tornando possível a concretização deste trabalho.

Aos meus avós, José Ribeiro de Souza (*in memoriam*) e Magnólia Matos de Souza (*in memoriam*), minha base e minha inspiração a quem devo toda a minha gratidão. O apoio, carinho, conselhos e a confiança incondicional que sempre depositaram em mim foram fundamentais em cada etapa dessa trajetória. Muito mais do que incentivo acadêmico, recebi amor, exemplo de perseverança e a certeza de que nunca estive sozinho.

Aos meus amigos, Alexandre Rezende, Lorena Gonçalves e Camila Fonseca, pela parceria diária, companheirismo, conversas, trocas de conhecimento e pelos momentos de descontração. A convivência com vocês foi essencial não apenas para a pesquisa, mas também para o meu crescimento pessoal ao longo dessa jornada. Me senti abençoado por poder ter a amizade de cada um.

Ao professor Eduardo Severiano, pela orientação cuidadosa, paciência, confiança e pelas valiosas contribuições científicas ao longo de todo o processo. Seus ensinamentos, sua postura ética e seu compromisso com a ciência foram decisivos para a construção deste trabalho, dando direção para minha formação acadêmica e profissional.

Ao técnico de laboratório Wainer, pela disponibilidade, atenção e apoio constante, sempre disposto a contribuir para o bom andamento das atividades e para a superação dos desafios práticos da pesquisa.

Aos fazendeiros que gentilmente participaram da pesquisa, pela receptividade, colaboração e confiança, fundamentais para a realização das coletas e para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano), pela oportunidade de realização do curso e pela estrutura oferecida e todo quadro docente do Programa de Pós Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia (PPGCA).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa, que possibilitou dedicação integral e viabilizou a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Ítalo Rômulo Mendes de Souza nasceu em 16 de novembro de 1992, em Brasília, Distrito Federal, Brasil. Aos quatro anos de idade, mudou-se para o município de Formosa do Rio Preto, no estado da Bahia.

Em 2011, ingressou no curso Técnico em Meio Ambiente, na modalidade subsequente, concluindo-o em novembro de 2012. Em fevereiro de 2012, iniciou a graduação, Tecnólogo em Gestão Ambiental, obtendo o título em maio de 2015. Posteriormente, cursou a Especialização em Estudos Geoambientais e Licenciamento, concluída em novembro de 2017. Todos esses cursos foram realizados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) – Campus Corrente, sob orientação da Profa. Bruna de Freitas Iwata.

Em março de 2018, ingressou no curso de Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado pelo Instituto Federal Goiano (IF Goiano) – Campus Urutaí, concluindo-o em abril de 2020, sob orientação do Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva, Renato Paiva de Lima e Prof. Edson Eyji Sano.

Em agosto de 2020, iniciou o curso de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, na condição de bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob orientação do Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano, com conclusão em fevereiro de 2026.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES E UNIDADES.....	vii
RESUMO GERAL.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	14
REFERÊNCIAS.....	17
OBJETIVOS.....	23
CAPÍTULO 1. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS BRASILEIROS REPRESENTATIVOS EM AMBIENTES TROPICAIS	
Resumo.....	24
Abstract.....	25
1.INTRODUÇÃO.....	26
2.MATERIAL E MÉTODOS.....	27
2.1. <i>Identificação da área estudada e descrição dos locais de amostragem.....</i>	<i>27</i>
2.2. <i>Protocolo de amostragem do solo.....</i>	<i>30</i>
2.3. <i>Caracterização física, química e mineralógica.....</i>	<i>31</i>
2.4. <i>Ensaio de Compressão Uniaxial para determinação da Pressão de Pré-consolidação.....</i>	<i>31</i>
2.5. <i>Análise Estatística.....</i>	<i>32</i>
3. RESULTADOS.....	32
4. DISCUSSÃO.....	37
4.1. <i>Composição física, química e mineralógica no comportamento compressivo dos solos estudados.....</i>	<i>37</i>
4.2. <i>Desenvolvimento de Funções de pedotransferência para estimativa do comportamento compressivo de solos brasileiros representativos em ambientes tropicais.....</i>	<i>39</i>

<i>4.3. Suscetibilidade à compactação de solos brasileiros representativos de ambientes tropicais.....</i>	<i>41</i>
5. CONCLUSÃO.....	42
6. REFERÊNCIAS.....	43

CAPÍTULO 2. ASPECTOS METODOLÓGICOS DA DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS TROPICAIS: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM CAMPO E LABORATÓRIO

Resumo.....	50
Abstract.....	51
1. INTRODUÇÃO	52
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
<i>2.1. Identificação e caracterização das áreas de estudo.....</i>	<i>53</i>
<i>2.2. Protocolo de campo dos projetos englobados e amostragem de solo.....</i>	<i>54</i>
<i>2.3. Procedimentos laboratoriais de análises físico-hídricas do solo.....</i>	<i>56</i>
<i>2.4. Tratamento estatístico dos resultados.....</i>	<i>57</i>
3. RESULTADOS	58
4. DISCUSSÃO.....	69
<i>4.1. Camadas de impedimento mecânico no solo.....</i>	<i>69</i>
<i>4.2. Atributos físicos do solo em laboratório.....</i>	<i>73</i>
<i>4.3. Penetrometria de campo e laboratório na diagnose da compactação do solo.....</i>	<i>76</i>
5. CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS.....	81
CONCLUSÕES GERAIS.....	87

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 1 - FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS BRASILEIROS REPRESENTATIVOS EM AMBIENTES TROPICAIS

Tabela 1. Locais de amostragens e descrição dos solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....	29
Tabela 2. Momentos estatísticos dos atributos físicos de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....	33
Tabela 3. Resultados da regressão múltipla <i>Stepwise</i> para todos os dados e em duas etapas para solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....	34
Tabela 4. Resultados da regressão múltipla <i>Stepwise</i> para todos os dados e em três etapas para o conteúdo de argila+silte de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....	35

Capítulo 2 - ASPECTOS METODOLÓGICOS DA DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS TROPICAIS: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM CAMPO E LABORATÓRIO

Tabela 1. Momentos estatísticos de atributos físicos do solo (obtidos em laboratório), em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).....	62
Tabela 2. Efeitos diretos e indiretos e correlação de diagrama causal da regressão múltipla de determinação da densidade do solo relativa (Dsrel) em função dos atributos físicos do solo obtidos em laboratório, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).....	64
Tabela 3. Regressões lineares e comparação entre as regressões de ajuste da resistência do solo à penetração obtida em laboratório (RP, MPa) em função da densidade do solo relativa (Dsrel), em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde) e de acordo com Snedecor e Cochran (1989).....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 - FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS BRASILEIROS REPRESENTATIVOS EM AMBIENTES TROPICAIS

- Figura 1.** Localização das áreas de amostragem dos solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....30
- Figura 2.** Triângulo e classificação textural dos horizontes diagnósticos de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....34
- Figura 3.** Representação dos valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) predita pelas funções de pedotransferência para todos os dados (A) e para o conteúdo de argila+silte (B), em relação aos valores estimados de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....36
- Figura 4.** Pressão de pré-consolidação (σ_p) em função do potencial matricial (Ψ_m) e do teor de argila+silte em solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.....37

Capítulo 2 - ASPECTOS METODOLÓGICOS DA DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS TROPICAIS: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM CAMPO E LABORATÓRIO

- Figura 1.** Mapa político do Brasil com os pontos representando os locais de amostragem em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais no Brasil e Paraguai.55
- Figura 2.** Histograma de frequência da resistência do solo à penetração (MPa) em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais (2A), e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil) (2B), de agricultura regenerativa (Regenera) (2C) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde) (2D).....59
- Figura 3.** Histograma de frequência da camada de maior impedimento mecânico (m) em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais, e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).....60
- Figura 4.** Histograma de frequência da camada de maior impedimento mecânico (m) em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais agrupadas em solos com morfologia de

latossólica (A) e em solos indiscriminados (B).....	61
Figura 5. Dispersão bidimensional dos escores da análise de componentes principais dos atributos físicos do solo obtidos em laboratório, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde) (A), também em função da textura do solo (B).	63
Figura 6. Contribuição das variáveis para a primeira dimensão (A) e a segunda (B) avaliadas em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).....	64
Figura 7. Correlação entre a densidade do solo relativa e a resistência do solo à penetração obtida em campo, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).....	65
Figura 8. Correlação entre a densidade do solo relativa e resistência do solo à penetração obtida em laboratório, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).....	69

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

Am – Clima tropical de monção

Aw – Clima tropical com estação seca no inverno

Bw1 – Horizonte B latossólico

Cfa – Clima subtropical úmido

cm - Centímetros

COT – Carbono orgânico total

CV – Coeficiente de variação

°C - Graus Celsius

Dim1 – Dimensão 1

Dim2 - Dimensão 2

dm³ dm⁻³ - decímetro cúbico por decímetro cúbico

Dp – Densidade de partícula

Ds – Densidade do solo

Dsref - Densidade do solo de referência

Dsrel - Densidade do solo relativa

Dsl - Densidade do solo no limite crítico

Fe₂O₃ - Óxido de ferro

FPT – Funções de Pedotransferência

g - grama

GO-DF – Campanha realizada no Estado do Goiás e Distrito Federal

GPS - Sistema de Posicionamento Global

g kg⁻¹ - Grama por quilograma

H₂SO₄ - Ácido sulfúrico

IC – Intervalo de confiança

J - Joule

Kg - Quilograma

kg dm⁻³ - Quilograma opor decímetro cúbico

kPa - Quilopascal

M - Massa

Macro - Macroporosidade

MATOPIBA - Região agrícola formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia

Micro - Microporosidade

Min - Minuto

ml⁻¹ - Mililitro por unidade inversa

mm - Milímetro

MPa - Megapascal

MS-MY - Campanha realizada no estado de Mato Grosso do Sul e no Paraguai

MT-RO - Campanha realizada nos estados de Mato Grosso e Roraima

NaOH - Hidróxido de sódio

ns - Não significativo estatisticamente

PCA - Análise de Componentes Principais

PR-SC - Campanha realizada nos estados do Paraná e Santa Catarina

PT – Porosidade Total

R² - Coeficiente de determinação

RP – Resistência do solo à penetração

RR - Roraima

Rpm – Rotações por minuto

SiO₂ - Dióxido de Silício

SP – São Paulo

σ_p - Pressão de pré-consolidação

TFSA – Terra fina seca ao ar

USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

W – Trabalho ou energia

WRB - Base de Referência Mundial para Recursos do Solo

Ψ_m - Potencial matricial do solo

RESUMO GERAL

SOUZA, I. R. M. **Diagnose da compactação do solo: abordagens metodológicas na penetrometria e textura.** 2026. 89p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia. Instituto Federal Goiano) – *Campus* Rio Verde – GO, Brasil.

A compactação do solo constitui uma das principais formas de degradação física associadas à intensificação da agropecuária em ambientes tropicais, comprometendo o crescimento radicular, o funcionamento hidrológico, a provisão de serviços ecossistêmicos e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Apesar de sua relevância, a diagnose da compactação do solo ainda representa um desafio metodológico, sobretudo devido às limitações inerentes aos indicadores tradicionalmente utilizados, como a resistência do solo à penetração e a caracterização textural convencional, especialmente em solos altamente intemperizados. Nesse contexto, esta tese teve como objetivo avaliar métodos de diagnose da compactação do solo em ambientes tropicais, com ênfase nas limitações associadas à resistência mecânica, à caracterização textural e à estimativa do comportamento compressivo do solo. Especificamente, analisaram-se a distribuição da resistência à penetração, a influência de atributos físicos, químicos, texturais e mineralógicos sobre a pressão de pré-consolidação, além do desempenho de modelos estatísticos e funções de pedotransferência. A pesquisa foi estruturada em dois capítulos complementares. No primeiro, avaliou-se a resistência do solo à penetração obtida em campo e em condições laboratoriais, a partir de uma base de dados proveniente de agroecossistemas tropicais distribuídos em diferentes regiões edafoclimáticas. Os resultados indicaram elevada frequência de valores considerados restritivos à penetração radicular nas avaliações de campo, concentrados predominantemente nas camadas superficiais do solo. Entretanto, verificou-se que a resistência medida *in situ* apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, além de tendência à superestimação do impedimento mecânico, refletindo sua forte dependência do teor de água, da textura e da heterogeneidade estrutural do solo. Em contraste, as medições realizadas em laboratório mostraram maior coerência diagnóstica, especialmente quando associadas a indicadores estruturais mais estáveis, como a densidade do solo relativa e a organização do sistema poroso, evidenciando que a resistência à penetração deve ser interpretada como um indicador funcional complementar, e não como critério diagnóstico isolado. No segundo capítulo, foram desenvolvidas funções de pedotransferência para estimar a pressão de pré-consolidação de solos brasileiros representativos de ambientes tropicais, a partir de atributos físicos, químicos e mineralógicos. Os modelos estatísticos obtidos apresentaram elevado poder explicativo, demonstrando que o comportamento compressivo dos solos tropicais é fortemente controlado pela interação entre o teor de água no solo e o conteúdo de frações finas (argila+silte), refletindo a influência conjunta da textura, da mineralogia e da organização estrutural. Os resultados indicaram ainda que esses solos apresentam baixa capacidade de suporte de carga, tornando a compactação praticamente inevitável sob tráfego mecanizado, mesmo em condições aparentemente favoráveis de umidade. De forma integrada, os achados desta tese evidenciam que a compactação do solo em

ambientes tropicais constitui um estado estrutural recorrente, condicionado tanto por fatores intrínsecos do solo quanto pelas limitações metodológicas dos indicadores empregados em sua avaliação. Conclui-se que a diagnose da compactação requer uma abordagem integrada entre campo e laboratório, aliando a identificação das camadas impeditivas à caracterização estrutural e compressiva do solo, bem como o uso criterioso de modelos preditivos, contribuindo para decisões de manejo mais eficientes e para a sustentabilidade física dos sistemas agrícolas tropicais.

Palavras-chave: Compactação do solo; Funções de pedotransferência; Resistência à penetração; Qualidade física do solo; Solos tropicais.

GENERAL ABSTRACT

SOUZA, I. R. M. **Diagnosis of soil compaction: methodological approaches in penetrometry and texture.** 2026. 89p. Thesis (Doctorate in Agricultural Sciences – Agronomy. Instituto Federal Goiano) – Campus Rio Verde – GO, Brazil.

Soil compaction is one of the main forms of physical degradation associated with the intensification of agriculture in tropical environments, compromising root growth, hydrological functioning, the provision of ecosystem services, and the sustainability of agricultural systems. Despite its relevance, the diagnosis of soil compaction still represents a methodological challenge, mainly due to the limitations inherent in traditionally used indicators, such as soil resistance to penetration and conventional textural characterization, especially in highly weathered soils. In this context, this thesis aimed to evaluate methods for diagnosing soil compaction in tropical environments, with an emphasis on the limitations associated with mechanical resistance, textural characterization, and estimation of soil compressive behavior. The research was structured in two complementary chapters. In the first chapter, soil resistance to penetration was evaluated in the field and under laboratory conditions, based on a database from tropical agroecosystems distributed across different edaphoclimatic regions. The results indicated a high frequency of values considered restrictive to root penetration in field assessments, concentrated predominantly in the surface layers of the soil. However, it was found that the resistance measured in situ shows high spatial and temporal variability, as well as a tendency to overestimate mechanical impedance, reflecting its strong dependence on water content, texture, and structural heterogeneity of the soil. In contrast, laboratory measurements showed greater diagnostic consistency, especially when associated with more stable structural indicators, such as relative soil density and pore system organization, demonstrating that penetration resistance should be interpreted as a complementary functional indicator rather than an isolated diagnostic criterion. In the second chapter, pedotransfer functions were developed to estimate the preconsolidation pressure of Brazilian soils representative of tropical environments, based on easily obtained physical, chemical, and mineralogical attributes. The statistical models obtained had high explanatory power, demonstrating that the compressive behavior of tropical soils is strongly controlled by the interaction between soil water content and fine fraction content, reflecting the combined influence of texture, mineralogy, and structural organization. The results also indicated that these soils have low load-bearing capacity, making compaction practically inevitable under mechanized traffic, even under apparently favorable moisture conditions. Taken together, the findings of this thesis show that soil compaction in tropical environments is a recurring structural condition, conditioned both by intrinsic soil factors and by the methodological limitations of the indicators used in its assessment. It is concluded that the diagnosis of compaction requires an integrated approach between the field and the laboratory, combining the identification of impeding layers with the structural and compressive characterization of

the soil, as well as the judicious use of predictive models, contributing to more efficient management decisions and the physical sustainability of tropical agricultural systems.

Keywords: Soil compaction; Pedotransfer functions; Penetration resistance; Physical soil quality; Tropical soils.

INTRODUÇÃO GERAL

A segurança alimentar e o uso sustentável dos recursos naturais configuram-se como desafios centrais para a agricultura moderna, especialmente diante da intensificação das mudanças climáticas e do crescimento populacional global (Modiba et al., 2025). Projeções indicam que a população mundial poderá atingir aproximadamente 9,6 bilhões de habitantes até 2050, ampliando significativamente a demanda por alimentos, fibras e bioenergia (Shaheb et al., 2021; Bručienė et al., 2025). Nesse contexto, a qualidade do solo assume papel estratégico na sustentação da produtividade agrícola e na resiliência dos sistemas de produção, uma vez que atributos físicos do solo influenciam diretamente processos fundamentais, como infiltração e armazenamento de água, aeração, crescimento radicular e ciclagem de nutrientes (Frene et al., 2024; Rezende et al., 2025).

O Brasil destaca-se nesse cenário por representar uma das principais fronteiras agrícolas globais, contribuindo de forma expressiva para o suprimento mundial de grãos e fibras (Demattê et al., 2022). Estimativas sugerem que o país poderá atender parcela significativa da demanda global por alimentos nas próximas décadas, consolidando-se como protagonista na produção agropecuária em larga escala (Lopes & Guilherme, 2016). Essa expansão produtiva ocorre predominantemente sobre solos tropicais altamente intemperizados, com destaque para os Latossolos, que ocupam mais de 40% do território nacional e constituem a base edáfica de grande parte das áreas agrícolas brasileiras (Schaefer et al., 2008; Santos et al., 2025) que são amplamente reconhecidos por sua elevada suscetibilidade à degradação física quando submetidos a pressões antrópicas intensivas (Severiano et al., 2013; Rezende et al., 2025).

Embora esses solos apresentem elevada estabilidade estrutural e boa aptidão ao manejo agrícola quando adequadamente conduzidos, sua exposição a sistemas intensivos de produção, caracterizados pelo tráfego frequente de máquinas e pela aplicação repetitiva de cargas mecânicas, tem ampliado a suscetibilidade à degradação física, especialmente por compactação (Severiano et al., 2013; Keller et al., 2019; Schjønning et al., 2023; Duan et al., 2023). Essa problemática é particularmente evidente no bioma Cerrado, região que reúne condições favoráveis à mecanização, relevo predominantemente plano a suavemente ondulado (Resck, 1998) e ampla ocorrência de solos profundamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade natural, com mineralogia dominada por argilas de baixa atividade e óxidos de ferro e alumínio (Rezende et al., 1997; Donagemma et al., 2016; Santos et al., 2021).

A compactação do solo promove alterações significativas em suas propriedades físicas, caracterizadas pelo aumento da densidade do solo e pela redução da porosidade total, especialmente da macroporosidade (Salman et al., 2021; Woldeyohannis et al., 2024). Essas modificações comprometem a dinâmica da água no solo, reduzindo a infiltração, a condutividade hidráulica e a capacidade de armazenamento hídrico em camadas superficiais e subsuperficiais (Chen et al., 2018; Rojas et al., 2022; Mbarki et al., 2023; Horn et al., 2025; Rathnayake et al., 2025). Como consequência, o estabelecimento das culturas é prejudicado, com restrições à germinação, à penetração radicular e ao crescimento inicial das plântulas, resultando em impactos negativos sobre o desenvolvimento das plantas e a produtividade agrícola (Masilamani et al., 2023).

A relevância da compactação do solo transcende os impactos produtivos, estendendo-se à provisão de serviços ecossistêmicos, ao funcionamento hidrológico das paisagens agrícolas e à eficiência no uso de recursos edáficos e hídricos (de Moura et al., 2021; Schjønning, 2023). A literatura documenta amplamente os fatores e os efeitos da compactação do solo, considerando desde o tráfego de máquinas e o manejo agrícola até suas implicações sobre atributos físico-hídricos e o crescimento radicular (de Lima et al., 2016; ten Damme et al., 2021; Schjønning et al., 2023; Sun et al., 2026). Nesse sentido, a compreensão dos fatores que controlam a ocorrência e a intensidade da compactação, bem como o aprimoramento de métodos diagnósticos, torna-se essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentáveis e para a mitigação da degradação estrutural do solo.

A avaliação da compactação baseia-se, tradicionalmente, em indicadores de qualidade física do solo, entre os quais a resistência do solo à penetração se destaca pela simplicidade operacional, rapidez de obtenção de dados e ampla aceitação em estudos agronômicos e ambientais (Benevenuto et al., 2020; Naderi-Boldaji et al., 2023; Suzuki et al., 2024). Entretanto, a interpretação desse indicador apresenta limitações relevantes, uma vez que seus valores são fortemente influenciados pelo teor de água do solo, pela densidade do solo, pela matéria orgânica e, de forma particularmente significativa, pela textura do solo, dificultando a definição de valores críticos universais associados à restrição ao crescimento radicular (Kumi et al., 2023; Moraes et al., 2024; Calleja-Huerta et al., 2026).

Como abordagem complementar, ensaios de compressão uniaxial e a determinação da pressão de pré-consolidação têm sido amplamente utilizados para caracterizar o comportamento mecânico do solo e sua capacidade de suporte de carga (Severiano et al., 2013; Keller et al., 2022; Torres et al., 2024). Embora forneçam informações robustas, esses métodos apresentam

elevada demanda operacional e dependência de interpretações subjetivas (Dias Junior et al., 1995; da Silva & de Lima, 2015) associadas à análise gráfica das curvas de compressão para identificação do ponto de curvatura, o que limita sua aplicação em avaliações rotineiras e em escalas espaciais mais amplas (Cavalieri et al., 2008; Holthusen et al., 2018).

Nesse contexto, observa-se crescente interesse no desenvolvimento de funções de pedotransferência (FPT) voltadas à estimativa de atributos mecânicos do solo a partir de variáveis de mais fácil obtenção (Botula et al., 2014; Perreault et al., 2022). Contudo, a aplicabilidade dessas funções em solos tropicais altamente intemperizados ainda é limitada, em razão da forte dependência dos dados de entrada (Turek et al., 2025), a exemplo da textura do solo e das particularidades estruturais associadas à mineralogia dominada por caulinita, gibbsita e óxidos, que dificultam a dispersão completa das partículas e podem comprometer a representação textural convencional (Schaefer et al., 2008; Severiano et al., 2013).

Dessa forma, apesar dos avanços metodológicos, persiste uma lacuna importante relacionada à interpretação da resistência do solo à penetração e de outros indicadores mecânicos sob variações texturais em solos tropicais, especialmente em Latossolos, em razão da ausência de valores críticos ajustados às diferentes classes texturais, das limitações da interpretação isolada da penetrometria nesses solos e da insuficiência de modelos integrados que considerem conjuntamente textura, umidade e estrutura do solo. A elevada estabilidade estrutural desses solos, aliada às limitações analíticas da determinação da textura e à complexidade da interação entre atributos físicos, impõe desafios adicionais à diagnose da compactação e à definição de critérios diagnósticos consistentes entre diferentes pedoambientes, sustentando a hipótese de que a integração entre atributos físicos, texturais, estruturais e hídricos pode aumentar a consistência da interpretação dos indicadores mecânicos da compactação em solos tropicais. Assim, torna-se necessário aprofundar o entendimento dos aspectos metodológicos envolvidos na avaliação da compactação do solo, com ênfase na interação entre resistência mecânica, textura e métodos diagnósticos, de modo a aprimorar a confiabilidade das interpretações, subsidiar o desenvolvimento de indicadores mais robustos e contribuir para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas tropicais.

REFERÊNCIAS

- Benevenuto, P. A. N., Morais, E. G. de, Souza, A. A., Vasques, I. C. F., Cardoso, D. P., Sales, F. R., Severiano, E. C., Homem, B. G. C., Casagrande, D. R., & Silva, B. M. (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, *117*, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>
- Botula, Y.-D., Van Ranst, E., & Cornelis, W. M. (2014). Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *38*(3), 679–698. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300001>
- Bručienė, I., Buragienė, S., & Šarauskis, E. (2025). Comparative evaluation of the effect of conventional and robotic mechanical weeding on topsoil physical attributes. *Soil and Tillage Research*, *254*, 106739. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106739>
- Calleja-Huerta, A., Munkholm, L. J., & Lamandé, M. (2026). A new model framework for infield spatialization of traffic induced soil compaction. *Soil and Tillage Research*, *255*, 106775. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106775>
- Cavaliere, K. M. V., Arvidsson, J., da Silva, A. P., & Keller, T. (2008). Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, *98*(1), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.09.020>
- Chen, T., Sedighi, M., Jivkov, A., & Seetharam, S. C. (2019). Unsaturated Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite: Revisit of Microstructure Effects. In *The International Congress on Environmental Geotechnics* (pp. 544–550). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2224-2_67
- da Silva, A. R., & de Lima, R. P. (2015). soilphysics: An R package to determine soil preconsolidation pressure. *Computers & Geosciences*, *84*, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.08.008>
- de Lima, R. P., Rolim, M. M., da Silva, A. R., de Oliveira, V. S., Pedrosa, E. M. R., & Tavares, U. E. (2016). Simple Models for Predicting Agricultural Trafficability on Cohesive Soils Cultivated with Sugarcane in Brazil. *Sugar Tech*, *18*(4), 347–353. <https://doi.org/10.1007/s12355-015-0413-y>

- Demattê, J. A. M., Giasson, E., Couto, E. G., Samuel-Rosa, A., de Castro, S. S., Dalmolin, R. S. D., Brilha, J., Botelho, R. G. M., Azevedo, A. C., Cerri, C. E. P., dos Anjos, L. H. C., de Lourdes Mendonça-Santos, M., Boechat, C. L., do Amaral, E. F., da Silva Júnior, J. F., Junior, A. F. N., Poppiel, R. R., Horst, T. Z., da Silva, L. M., & Pereira, M. G. (2022). The Brazilian soil priorities. *Geoderma Regional*, 29, e00503. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00503>
- de Moura, M. S., Silva, B. M., Mota, P. K., Borghi, E., Resende, A. V. de, Acuña-Guzman, S. F., Araújo, G. S. S., da Silva, L. de C. M., de Oliveira, G. C., & Curi, N. (2021). Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. *Agricultural Water Management*, 243, 106523. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106523>
- Dias Junior, M. S., & Pierce, F. J. (1995). A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8(2), 139–151. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00015-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00015-8)
- Donagemma, G. K., Freitas, P. L. de, Balieiro, F. de C., Fontana, A., Spera, S. T., Lumbreras, J. F., Viana, J. H. M., Araújo Filho, J. C. de, Santos, F. C. dos, Albuquerque, M. R. de, Macedo, M. C. M., Teixeira, P. C., Amaral, A. J., Bortolon, E., & Bortolon, L. (2016). Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1003–1020. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900001>
- Duan, X., Jin, K., Mao, Z., Liu, L., He, Y., Xia, S., Hammond, J. P., White, P. J., Xu, F., & Shi, L. (2023). Compacted soil adaptability of Brassica napus driven by root mechanical traits. *Soil and Tillage Research*, 233, 105785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105785>
- Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>
- Holthusen, D., Brandt, A. A., Reichert, J. M., Horn, R., Fleige, H., & Zink, A. (2018). Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. *Soil and Tillage Research*, 184, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.009>

- Horn, R., Fleige, H., Dörner, J., Zimmermann, I., & Wendroth, O. (2025). Pore rigidity as an undervalued process in soil structure development. *Soil and Tillage Research*, 245, 106280. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106280>
- Keller, T., & Or, D. (2022). Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(21). <https://doi.org/10.1073/pnas.2117699119>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kumi, F., Obour, P. B., Arthur, E., Moore, S. E., Asare, P. A., Asiedu, J., Angnuureng, D. B., Atiah, K., Amoah, K. K., Amponsah, S. K., Dorvlo, S. Y., Banafo, S., & Adu, M. O. (2023). Quantifying root-induced soil strength, measured as soil penetration resistance, from different crop plants and soil types. *Soil and Tillage Research*, 233, 105811. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105811>
- Lopes, A. S., & Guimarães Guilherme, L. R. (2016). *A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil* (pp. 1–72). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- Masilamani, P., Venkatesan, S., Navamaniraj, K. N., Rajarathinam, P., Alagesan, A., & Thiagu, K. (2023). Impact of the orientation of seed placement and depth of its sowing on germination: A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 15(1), 314–324. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i1.4265>
- Mbarki, Y., Gumiere, S. J., Celicourt, P., & Brédy, J. (2023). Study of the effect of the compaction level on the hydrodynamic properties of loamy sand soil in an agricultural context. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1255495>
- Modiba, M. M., Ocansey, C. M., Ibrahim, H. T. M., Birkás, M., Dekemati, I., & Simon, B. (2025). Assessing 16 Years of Tillage Dynamics on Soil Physical Properties, Crop Root Growth and Yield in an Endocalcic Chernozem Soil in Hungary. *Agronomy*, 15(4), 801. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040801>
- Moraes, M. T. de, Olbermann, F. J. R., Bonetti, J. de A., Pilegi, L. R., Costa, M. V. R., Pacheco, V., Rogers, C. D., & Guimarães, R. M. L. (2024). The impacts of cover crop mixes on the

penetration resistance model of an Oxisol under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 242, 106138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106138>

Naderi-Boldaji, M., Karparvarfard, S. H., & Azimi-Nejadian, H. (2023). Investigation of the predictability of mouldboard plough draught from soil mechanical strength (cone index vs. shear strength) using finite element modelling. *Journal of Terramechanics*, 108, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.04.001>

Nihal D. Salman, György Pillinger, & Péter Kiss. (2021). Soil behavior of shallow homogenous upper layer soil. *Journal of Applied Science and Engineering*, 25, 159–164. [https://doi.org/10.6180/jase.202202_25\(1\).0016](https://doi.org/10.6180/jase.202202_25(1).0016)

Perreault, S., El Alem, A., Chokmani, K., & Cambouris, A. N. (2022). Development of Pedotransfer Functions to Predict Soil Physical Properties in Southern Quebec (Canada). *Agronomy*, 12(2), 526. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020526>

Rathnayake, N. R. R. W. S., Leelamanie, D. A. L., & Maeda, M. (2025). Shallow-depth hardpan attributes influence soil surface and subsurface hydraulic properties. *CATENA*, 259, 109405. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109405>

Resck, D. V. S. (1998). Soil Quality and Agricultural Sustainability. In *Agricultural Intensification Systems and Their Impact on Soil and Water Quality* (pp. 270–288).

Resende, M., Curi, N., Rezende, S. B., & Correa, G. F. (1997). *Pedologia: base para a descrição de ambientes* (2nd ed.). NEPUT.

Rezende, A. G., Souza, I. R. M. de, Fonseca, C. M., Delmod, J. G., Silva, E. A., Costa, K. A. de P., & Severiano, E. da C. (2025). Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: Implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions. *Geoderma*, 459, 117395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117395>

Rojas, J. P., Ruge, J. C., & Carrillo, G. A. (2022). Unsaturated Hydraulic Conductivity in Composite Porous Media. *Applied Sciences*, 12(18), 9058. <https://doi.org/10.3390/app12189058>

Santos, H. G. ;, Jacomine, P. K. T. ;, Anjos, L. H. C. ;, Oliveira, V. A. ;, Lumbrreras, J. F. ;, Coelho, M. R. ;, Almeida, J. A. ;, Araujo Filho, K. C. ;, Oliveira, J. B. ;, & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: (Quinta Edição)* Embrapa Solos.

- Santos, R. S., Wiesmeier, M., Cherubin, M. R., Oliveira, D. M. S., Locatelli, J. L., Holzschuh, M., & Cerri, C. E. P. (2021). Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. *Geoderma*, *400*, 115149. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Lima, H. N., Marques, F. A., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2025). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (6. ed.). Embrapa Solos.
- Schaefer, C. E. G. R., Fabris, J. D., & Ker, J. C. (2008). Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. *Clay Minerals*, *43*(1), 137–154. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.11>
- Schaefer, C. E. G. R., Siqueira, R. G., Pereira, L. F., Gomes, L. de C., Almeida, P. H. A., Francelino, M. R., Firmino, F. H. T., de Souza, J. J. L. L., Ker, J. C., & Fernandes-Filho, E. I. (2025). Brazilian Latossolos (Ferralsols, Oxisols) from different biomes: a multiproxy study on the spatial variability of the most weathered tropical soils in South America. *Geoderma Regional*, *43*, e01012. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e01012>
- Schjønning, P. (2023). An empirical model for prediction of topsoil deformation in field traffic. *Soil and Tillage Research*, *227*, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105589>
- Schjønning, P., Lamandé, M., De Pue, J., Cornelis, W. M., Labouriau, R., & Keller, T. (2023). *The challenge in estimating soil compressive strength for use in risk assessment of soil compaction in field traffic* (pp. 61–105). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.003>
- Severiano, E. da C., César de Oliveira, G., Junior, M. de S. D., Curi, N., Costa, K. A. de P., & Carducci, C. E. (2013). Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, *51*(3), 193–202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of Biosystems Engineering*, *46*(4), 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- Sun, Y., Zhang, Q., Liao, Q., Cai, J., & Yan, H. (2026). Analysis of rapeseed embryo root penetration resistance under different soil compaction levels based on the discrete element method. *Soil and Tillage Research*, *258*, 106953. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106953>

- Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Pillon, C. N., & Reichert, J. M. (2024). Mechanical Resistance to Penetration for Improved Diagnosis of Soil Compaction at Grazing and Forest Sites. *Forests*, *15*(8), 1369. <https://doi.org/10.3390/f15081369>
- ten Damme, L., Schjønning, P., J. Munkholm, L., Green, O., K. Nielsen, S., & Lamandé, M. (2021). Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling. *Soil and Tillage Research*, *213*, 105128. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105128>
- Torres, L. C., Nemes, A., ten Damme, L., & Keller, T. (2024). Current limitations and future research needs for predicting soil precompression stress: A synthesis of available data. *Soil and Tillage Research*, *244*, 106225. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106225>
- Turek, M. E., Pullens, J. W. M., Meurer, K. H. E., Moura Lima, E., Mehdi-Schulz, B., & Holzkämper, A. (2025). Pedotransfer Functions Versus Model Structure: What Drives Variance in Agro-Hydrological Model Results? *European Journal of Soil Science*, *76*(2). <https://doi.org/10.1111/ejss.70088>
- Woldeyohannis, Y. S., S Hiremath, S., Tola, S., & Wako, A. (2024). Influence of soil physical and chemical characteristics on soil compaction in farm field. *Heliyon*, *10*(3), e25140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25140>

OBJETIVOS

Geral:

Avaliar métodos de diagnose da compactação do solo em ambientes tropicais, com ênfase nas limitações metodológicas associadas à caracterização textural, à estimativa da compressibilidade e à resistência do solo à penetração.

Específicos:

- Avaliar a frequência e a distribuição dos valores de resistência do solo à penetração em ambientes tropicais;
- Caracterizar a distribuição em profundidade das camadas com maior impedimento mecânico do solo;
- Analisar a relação entre densidade do solo relativa e resistência à penetração obtida em campo e em laboratório;
- Aplicar as funções de pedotransferência na avaliação da compactação em solos tropicais;
- Avaliar a relação entre atributos físicos e químicos do solo e a pressão de pré-consolidação (σ_p) em solos tropicais sob uso agrícola;
- Desenvolver modelos estatísticos para a estimativa da σ_p a partir de atributos do solo de fácil obtenção;
- Analisar a influência da textura e da mineralogia típica de solos tropicais sobre o comportamento compressivo e a estimativa de σ_p ;
- Avaliar a consistência e as limitações dos modelos de estimativa de σ_p frente à variabilidade estrutural e textural dos solos tropicais.

CAPÍTULO I

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS BRASILEIROS REPRESENTATIVOS EM AMBIENTES TROPICAIS

Resumo: A compactação do solo tem sido responsável pela perda de potencial produtivo dos cultivos e de serviços ecossistêmicos em todo o mundo, levando à degradação das paisagens em particular nos ambientes tropicais. Na mitigação, as funções de pedotransferência destacam-se como ferramentas estratégicas para predição do comportamento compressivo do solo a partir de atributos de fácil mensuração, permitindo subsidiar tomadas de decisão acerca do manejo sustentável. O objetivo do trabalho foi desenvolver um procedimento estatístico para estimar a pressão de pré-consolidação em solos representativos de ambientes tropicais. O estudo contemplou 13 classes de solos do sudoeste do estado de Goiás pertencentes ao grupamento de maior abrangência na região do Cerrado e de maior relevância à produção agropecuária brasileira. Nestes, foram realizados o ensaio de compressão uniaxial para obtenção da curva de compressão do solo e, logo, a pressão de pré-consolidação, além de atributos de caracterização da composição física (areia, silte e argila, [estes determinados pelo método do ultrassom]; Densidade d solo e Densidade de partículas) e química (Carbono Orgânico Total e Óxidos de silício, alumínio e ferro) . Os resultados propõem modelos de regressão eficazes para estimar a pressão de pré-consolidação a partir destes atributos, sendo possível simplificar um modelo inicial com cinco variáveis para um modelo com apenas potencial matricial (ψ_m) e Argila+Silte, ainda assim explicando 87% da variabilidade dos dados. Os modelos evidenciam a elevada suscetibilidade à compactação dos solos tropicais brasileiros, que se intensifica com o aumento do teor de água e das frações finas, apresentando baixa capacidade de suporte frente às pressões dos maquinários agrícolas e tornando a compactação praticamente inevitável mesmo em condições de tráfego estando o solo parcialmente seco.

Palavras-chaves: Compactação do solo; Latossolo; Neossolo Quartzarênico; Pressão de pré-consolidação; Solos intemperizados; Ultrassom.

PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR ESTIMATING THE COMPRESSIVE BEHAVIOR OF REPRESENTATIVE BRAZILIAN SOILS IN TROPICAL ENVIRONMENTS

Abstract: Soil compaction has been responsible for the loss of crop production potential and ecosystem services worldwide, leading to landscape degradation, particularly in tropical environments. In mitigation, pedotransfer functions stand out as strategic tools for predicting soil compressive behavior based on easily measurable attributes, enabling informed decision-making about sustainable management. The objective of this study was to develop a statistical procedure to estimate preconsolidation pressure in soils representative of tropical environments. The study included 13 soils class from the southwest of the state of Goiás belonging to the most widespread group in the Cerrado region and of greatest relevance to Brazilian agricultural production. In these soils, uniaxial compression tests were performed to obtain the soil compression curve and, subsequently, the preconsolidation pressure, in addition to attributes characterizing the physical, chemical, and mineralogical composition of the soil. The results propose effective regression models for estimating pre-consolidation pressure based on these attributes, making it possible to simplify an initial model with five variables to a model with only ψ_m and Clay+Silt, still explaining 87% of the data variability. The models highlight the high susceptibility to compaction of Brazilian tropical soils, which intensifies with increasing water content and fine fractions, presenting low bearing capacity under the pressure of agricultural machinery and making compaction practically inevitable even under traffic conditions when the soil is partially dry.

Keywords: Soil compaction; Latosol, Quartzarenic Neosol; Pre-consolidation pressure; Weathered soils; Ultrasound.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira ocupa posição de destaque no cenário mundial, desempenhando papel estratégico na segurança alimentar, energética e ambiental (Souza et al., 2020). O país figura entre os maiores produtores e exportadores de *commodities* agropecuárias, com projeções indicando que poderá suprir parcela significativa da demanda global por alimentos nas próximas décadas (Lopes e Guilherme, 2016; Abreu & Lemos, 2023; Wang et al., 2023). Esse protagonismo está diretamente associado à expansão e intensificação produtiva no Bioma Cerrado, reconhecido como uma das principais fronteiras agrícolas tropicais do mundo (Winkler et al., 2021). No entanto, a consolidação desse modelo produtivo exige o uso eficiente dos recursos naturais e a adoção de práticas que assegurem a sustentabilidade dos solos, especialmente frente aos riscos de degradação física (Severiano et al., 2013; Derpsch et al., 2024).

Os solos predominantes no Cerrado são os Latossolos [Oxisols na USA Soil Taxonomy, USDA (2014); Ferralsols na World Reference Base for Soil Resources, IUSS Working Group WRB (2006)], sendo altamente intemperizados, profundos, com estrutura granular estável e mineralogia dominada por caulinita, óxidos de ferro e alumínio (Curi e Franzmeier, 1984; Marques et al., 2004; Santos et al., 2021). Tais solos são classificados como franco-arenosos ou com textura mais fina e ocupam aproximadamente 45% do território brasileiro. Ocorrem associados na paisagem aos Neossolos Quartzarênicos [Entisols (Quartzipsamments) na Soil Taxonomy; Arenosols na WRB] e ocupam menos de 10% do território, mas possuem grande relevância na produção agropecuária fundamentalmente pela similaridade morfológica com os Latossolos, embora sejam menos intemperizados do ponto de vista pedogenético e distintos taxonomicamente (Santos et al., 2025).

Apesar de apresentarem elevada friabilidade e boas condições estruturais sob estado natural, esses solos possuem características físicas que os tornam vulneráveis à compactação quando submetidos a pressões externas (Severiano et al., 2013; Rezende et al., 2025). Diversos estudos indicam que os Latossolos do Cerrado brasileiro figuram entre os solos mais suscetíveis à compactação no mundo (Severiano et al., 2011; Ajayi et al., 2009). Essa elevada vulnerabilidade decorre de fatores intrínsecos, como a microestrutura granular e a elevada porosidade (Schaefer et al., 2025) e de fatores extrínsecos relacionados ao tráfego frequente de

máquinas agrícolas pesadas e/ou pisoteio de animais quando as operações são realizadas sob condições inadequadas de umidade (Deon et al., 2018; Schojning et al., 2023).

Nesse contexto, a curva de compressão do solo tem sido amplamente empregada para avaliar o comportamento mecânico e prever a compactação (Dias Junior et al., 2019). Obtida por meio de ensaios de compressão uniaxial, essa curva permite identificar a pressão de pré-consolidação (σ_p), considerada o limite máximo de carga que pode ser aplicada sem promover compactação adicional (Severiano et al., 2013). A σ_p constitui um indicador-chave da capacidade de suporte e da suscetibilidade estrutural do solo, sendo ferramenta essencial para o planejamento do tráfego agrícola (Keller et al., 2019; Torres et al., 2024).

O uso funções de pedotransferência (FPTs) na modelagem do processo de compactação do solo representa avanço preditivo, pois possibilita estimar atributos mecânicos a partir de propriedades de fácil determinação, como os indicadores da composição física e mineralógica, conteúdo de água no solo, dentre outros (Benites et al., 2007; Rezende et al., 2025). A robustez dessas funções depende da representatividade dos solos avaliados (Beniaich et al., 2023; Farooq et al., 2024), especialmente em ambientes tropicais altamente intemperizados (Severiano et al., 2013).

Tais modelos de regressão mostram um forte potencial para substituir diretamente a σ_p quando sua avaliação da curva de compressão do solo não é viável. No entanto, De Vos et al. (2005) ressaltam a dificuldade de utilização de tais funções quando aplicadas em ambientes diferentes daqueles em que foram calibradas. Esse estudo parte da hipótese de que: Modelos estatísticos baseados em atributos físicos e químicos acessíveis são capazes de prever a σ_p em solos tropicais brasileiros com desempenho equivalente ao método tradicional da curva de compressão.

Assim, o objetivo do trabalho foi desenvolver um procedimento estatístico para estimar σ_p partir de atributos físicos e químicos do solo facilmente acessíveis em solos brasileiros representativos de ambientes tropicais, com potencial de subsidiar estratégias de manejo que promovam a sustentabilidade física decorrentes do uso agrícola em ambientes tropicais em todo o mundo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Identificação da área estudada e descrição dos locais de amostragem

As áreas estudadas foram previamente identificadas por Severiano et al. (2013) e Rezende et al. (2025), que realizaram a descrição morfológica de 13 perfis e os classificaram conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (Santos et al., 2025) em Neossolo Quartzarênico [ou Typic Quartzipsamments (USDA, 2014)] e Latossolos Vermelhos (ou Typic Haplustox) sob vegetação nativa, nos municípios de Acreúna, Castelândia, Paraúna e Rio Verde, Estado de Goiás, Brasil (Tabela 1; Figura 1). Esses são os grupamentos de solos de maior abrangência na região do Cerrado Brasileiro, ocorrendo associados e, pela semelhança morfológica e inserção em relevo pouco movimentado, tornando-os potencialmente aptos à agricultura mecanizada e intensiva.

O clima é classificado de acordo com *Köppen* (1931), como Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual varia entre 20°C e 25°C, sendo a temperatura média do mês mais frio superior a 16 °C. A média pluviométrica anual varia de 1500 a 2000 mm, com a máxima precipitação em janeiro e menores em junho, julho e agosto (<50 mm mês⁻¹).

Tabela 1. Locais de amostragens e descrição dos solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.

Legenda	Município	Coordenadas geográficas	Altitude	Cor de Munsell	Classificação do solo ¹
1	Paraúna	16°58'45" S; 50°25'59" W	662m	7,5YR 5/6	Neossolo Quartzarênico Órtico típico
2	Rio Verde	17°31'18" S; 51° 38'07" W	898m	5YR 5/4	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico
3	Rio Verde	17°57'29" S; 51°00'31" W	807m	2,5YR 3/6	Latossolo Vermelho Distrófico típico
4	Rio Verde	17°35'01" S; 51°37'12" W	871m	2,5YR 3/3	Latossolo Vermelho Distrófico típico
5	Rio Verde	17°43' 11" S; 50°59'49" W	803m	2,5YR 4/6	Latossolo Vermelho Distrófico típico
6	Rio Verde	17°53'50" S; 50°58'30" W	664m	10R 3/3	Latossolo Vermelho Distroférico típico
7	Rio Verde	17°46'02" S; 51°02'17" W	838m	2,5YR 4/6	Latossolo Vermelho Distrófico típico
8	Rio Verde	17°46'40" S; 50°47'52" W	685m	10R 3/4	Latossolo Vermelho Distroférico típico
9	Rio Verde	17°47'00" S; 50°57'55" W	726m	10R 3/4	Latossolo Vermelho Distroférico típico
10	Rio Verde	17°47'26" S; 50°57'17" W	727m	10R 3/6	Latossolo Vermelho Distroférico típico
11	Castelândia	18°08'40" S; 50°10'48" W	442 m	2,5YR 3/4	Latossolo Vermelho Acriférico típico
12	Rio Verde	17°30'52" S; 51°34'05" W	943m	2,5YR 4/4	Latossolo Vermelho Distrófico Típico
13	Acreúna	17°13'03" S; 50°23'35" W,	657m	2,5YR 3/4	Latossolo Vermelho Acriférico típico

¹: Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2025).

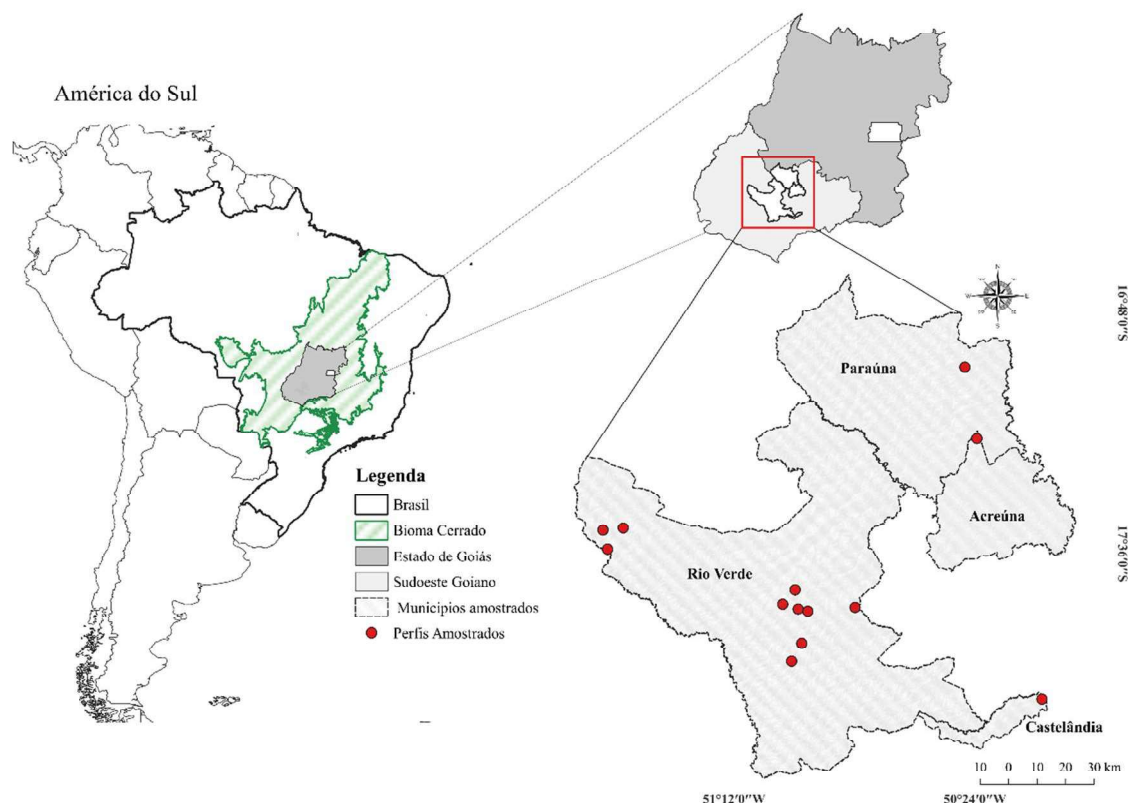


Figura 1. Localização das áreas de amostragem dos solos do estado de Goiás, Brasil, representativas de ambientes tropicais.

Os locais estudados representam a variabilidade textural existente nos solos tropicais brasileiros, cujo material de origem é formado majoritariamente por arenitos da formação Bauru e basalto em diferentes proporções, datados do Pré-cretáceo nas superfícies geomórficas Velhas (Curi e Franzmeier, 1984; Marques et al., 2004).

2.2. Protocolo de Amostragem do solo

Em cada perfil, foram abertas trincheiras com dimensões de 1 m x 1 m x 2 m e coletadas oito amostras de solo com estrutura preservada (indeformadas) em cilindros de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura nos centralizadas nos horizontes diagnósticos subsuperficiais (C2 e Bw1, entre 0,80 a 1,00 de profundidade), onde a estrutura do solo se expressa verdadeiramente (Severiano et al., 2013; Rezende et al., 2025).

Estas foram coletadas de forma aleatória, e utilizando o amostrador de Uhland, totalizaram 104 amostras (13 solos x 8 umidades), com o cuidado de se evitar a autocompactação para assegurar a boa representatividade. Na sequência, foram

aconditionadas em filmes plásticos e parafinadas, objetivando à preservação das mesmas até serem realizados os ensaios de compressibilidade, além de outras análises.

2.3. Caracterização física, química e mineralógica

As amostras foram inicialmente preparadas em laboratório, cujo solo correspondente às porções excedentes das partes superiores e inferiores do volume dos respectivos anéis foi seca ao ar e passadas por peneiras de 2 milímetros, obtendo assim as amostras deformadas de terra fina seca ao ar (TFSA).

As análises de caracterização física e química do solo foram realizadas conforme metodologias descritas em Teixeira et al. (2017). A textura do solo (aqui, o termo se refere à distribuição de partículas minerais primárias por tamanho), foi realizada por meio de dispersão ultrassônica, conforme as considerações de Rezende et al (2025), em que 10 g de TFSA foram submetidas a um sonicador (Bandelin, Alemanha) a 85 W por 5 min, o que corresponde a energia de $127,5 \text{ J ml}^{-1}$ (Ribeiro et al., 2017). As partículas de areia (2,00-0,05 mm) foram quantificadas por tamisagem e as de argila ($< 0,002 \text{ mm}$) por pipetagem, ao passo que as partículas de silte (0,05-0,002 mm) foram determinadas calculando a diferença entre o teor total de solo e os teores de areia e argila (Gee e Bauder, 1986).

A densidade de partículas (D_p) foi determinada utilizando-se água destilada e eliminação a vácuo do ar do picnômetro de acordo com Blake e Hartge (1986a), e o carbono orgânico total (COT) via oxidação com o dicromato de potássio (Walkley e Black, 1934).

Para a caracterização química, foram determinados os conteúdos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3) do extrato sulfúrico, após digestão com 9,4 M H_2SO_4 (densidade = 1,47). Este método é um procedimento padrão em solos brasileiros para indicar o grau de intemperismo do solo (Santos et al., 2025), considerado também um indicativo da composição mineralógica da fração argila de solos altamente intemperizados (Reatto et al., 2009; Rezende et al., 2025).

2.4. Ensaio de Compressão Uniaxial para determinação da Pressão de Pré-consolidação

As amostras indeformadas, previamente preparadas, foram inicialmente saturadas por capilaridade, sendo equilibradas em cada um dos seguintes potenciais matriciais (Ψ_m):

-1, -2, -6, -10 kPa, na unidade de sucção (Grohmann, 1960), -33, -100, -1.500 kPa, dentro de câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986) e -10.000 kPa, utilizando o psicrômetro WP4-T Dewpoint Potentia Meter (Decagon Devices, 2000) com quatro repetições, conforme as recomendações de Severiano et al. (2013), e após o ajuste da tensão de água no solo foram então submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA), conforme descrito por Dias Junior (1994).

As amostras indeformadas foram mantidas dentro da célula de compressão e submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até obter 90 % da deformação máxima (Taylor, 1948), sendo então aplicadas sucessivamente as pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas (Teixeira et al., 2017). Ao fim do ensaio, foram submetidas à estufa a 105°C por 48 horas para determinação da densidade do solo (D_s) através da relação entre a massa seca e o respectivo volume (Blake e Hartge, 1986b).

A curva de compressão do solo foi obtida ajustando-se graficamente, para cada amostra, o logaritmo da pressão aplicada (base 10) no eixo das abscissas, e a deformação do solo, mensurada por meio do incremento de D_s , no eixo das ordenadas. Os valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) foram determinados de acordo com metodologia descrita por Dias Junior e Pierce (1995).

2.5. Análise Estatística

Os resultados dos atributos avaliados foram submetidos à análise de estatística descritiva de posição (média, mínimo e máximo) e dispersão (desvio padrão, erro padrão e coeficiente de variação).

Os valores de pressão de pré-consolidação (variável dependente) em função das variáveis independentes (D_s , D_p , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , COT, Argila, Silte e Areia pelo método do ultrassom) foram submetidos ao procedimento “*Stepwise*” com a opção “*backward*” para obtenção das funções de pedotransferência (FPT) via regressão múltipla. 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, e não constituindo problema para a análise (Ribeiro et al., 2019).

Posteriormente, a textura do solo foi utilizada para validação das referidas funções. Todas as análises estatísticas descritas foram realizadas no software R (R Core Team, 2025).

3. RESULTADOS

Os resultados da estatística descritiva dos atributos físicos dos solos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Momentos estatísticos dos atributos físicos de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambiente tropical.

Atributo	Unidade	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	Coefficiente de Variação (%)	Mínimo	Máximo
σ_p	kPa	170,3	106,7	22,5	62,7	56,3	521,1
Umidade	kg kg ⁻¹	0,23	0,13	0,01	50,3	0,03	0,58
Ds	kg dm ⁻³	1,11	0,19	0,02	17,1	0,79	1,53
Dp	kg dm ⁻³	2,81	0,13	0,01	4,6	2,66	3,04
SiO ₂	g kg ⁻¹	66,6	43,7	4,3	65,6	22,0	180,0
Al ₂ O ₃	g kg ⁻¹	162,3	72,4	7,1	44,6	62,0	344,0
Fe ₂ O ₃	g kg ⁻¹	155,9	98,8	9,7	63,4	12,0	302,0
COT	g kg ⁻¹	8,2	4,0	0,4	49,6	1,6	14,1
Argila	g kg ⁻¹	446,7	226,3	22,2	50,7	72,7	823,1
Silte	g kg ⁻¹	96,8	46,9	4,60	48,5	24,1	158,7
Areia	g kg ⁻¹	456,5	263,3	25,8	57,7	66,0	902,9

σ_p : pressão de pré-consolidação; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; SiO₂: conteúdo de silício no extrato sulfúrico; Al₂O₃: conteúdo de alumínio no extrato sulfúrico; Fe₂O₃: conteúdo de ferro no extrato sulfúrico; COT: carbono orgânico total no solo; Areia: partículas de diâmetro entre 2,00 - 0,05 mm; Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm; Argila: partículas < 0,002 mm (g kg⁻¹), determinada pelo método do ultrassom.

A classificação textural é mostrada na Figura 2, com representações das classes arenosas até as mais argilosas, e pouco destaque à fração silte em todos os solos avaliados.

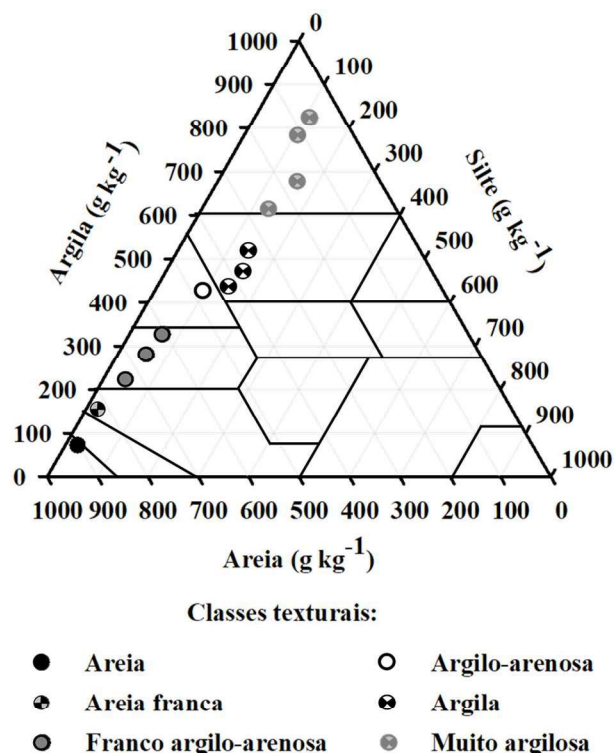


Figura 2. Triângulo e classificação textural dos horizontes diagnósticos de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.

Em uma primeira análise de regressão utilizando todos os dados de todos os solos (Tabela 2), foi desenvolvido um modelo no qual σ_p pode ser estimada a partir de ψ_m , Argila, Silte, SiO_2 e Fe_2O_3 (Modelo 1), explicando 88% da variabilidade dos dados da variável dependente pelo modelo de regressão. Na segunda etapa, obteve-se o modelo 2, não diferindo do anterior e igualmente explicando 88% da variabilidade de σ_p a partir de ψ_m , Argila, SiO_2 e Fe_2O_3 (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da regressão múltipla *Stepwise* para estimativa da pressão de pré-consolidação (σ_p) de todos os dados e em duas etapas para solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.

Modelo	Equação ¹	R ²	Comparação	p valor
1	$\sigma_p = 231,7 + 0,1397\psi_m - 0,00001180\psi_m^2 - 0,1494\text{Argila} - 2,452\text{Silte} - 1,635\text{SiO}_2 + 0,01013\text{SiO}_2^2 + 0,2144\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,88**	--	--
2	$\sigma_p = 255,4 + 0,1397\psi_m - 0,00001180\psi_m^2 - 0,1448\text{Argila} - 0,8687\text{SiO}_2 + 0,004824\text{SiO}_2^2 + 0,1713\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,88**	1x2	0,1931 ^{ns}

¹: ψ_m : Potencial matricial (tensão de água no solo); Argila: partículas < 0,002 mm (g kg^{-1}); Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm, determinados pelo método do ultrassom; SiO_2 : conteúdo de silício no extrato sulfúrico; Fe_2O_3 : conteúdo de ferro no extrato sulfúrico.

²: significância estatística a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ** significância estatística a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) e ns: diferença não significativa ($p \geq 0,05$).

Alternativamente, e em uma primeira análise de regressão utilizando os dados de todos os solos considerando o somatório de Argila e Silte, foi desenvolvido um modelo no qual σ_p pode ser estimada a partir de quatro variáveis dependentes, sendo ψ_m , (Argila+Silte), SiO_2 e Al_2O_3 (Modelo 3), cuja regressão explica 89% da variabilidade da variável dependente pelo modelo de regressão (Tabela 4). Após três etapas, obteve-se o modelo 5, que explica 87% ($p < 0,01$) da variância de σ_p e utiliza apenas duas variáveis independentes, ψ_m e (Argila+Silte).

Tabela 4. Resultados da regressão múltipla *Stepwise* para estimativa da pressão de pré-consolidação (σ_p) de todos os dados e em três etapas para o conteúdo de argila+silte de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.

Modelo	Equação ¹	R ²	Comparação	p valor
3	$\sigma_p = 247,7 + 0,1450\psi_m - 0,000012316\psi_m^2 - 0,1267\text{Argila+Silte} - 1,324\text{SiO}_2 + 0,008015\text{SiO}_2^2 - 0,0007880\text{Al}_2\text{O}_3$	0,89**	--	--
4	$\sigma_p = 245,9 + 0,1445\psi_m - 0,0000123\psi_m^2 - 0,2471\text{Argila+Silte} - 1,238\text{SiO}_2 + 0,007235\text{SiO}_2^2$	0,89**	3x4	0,1593 ^{ns}
5	$\sigma_p = 217,5 + 0,1450\psi_m - 0,0000123\psi_m^2 - 0,1725\text{Argila+Silte}$	0,87**	4x5	0,0002**

¹: ψ_m : Potencial matricial (tensão de água no solo); Argila: partículas $< 0,002$ mm (g kg^{-1}); Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 - 0,002 mm, determinados pelo método do ultrassom; SiO_2 : conteúdo de silício no extrato sulfúrico; Fe_2O_3 : conteúdo de ferro no extrato sulfúrico.

²: significância estatística a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ** significância estatística a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) e ns: diferença não significativa ($p \geq 0,05$).

A avaliação de desempenho dos modelos propostos é vista na figura 3, em que mostra a relação entre a σ_p estimada em laboratório e predita pelas funções de pedotransferência, com base nos conteúdos isolados das frações (Figura 3A) ou pelo somatório de argila+silte (Figura 3B). Pela distribuição, argila+silte apresenta maior capacidade preditiva e com destaque à função simplificada (modelo 5).

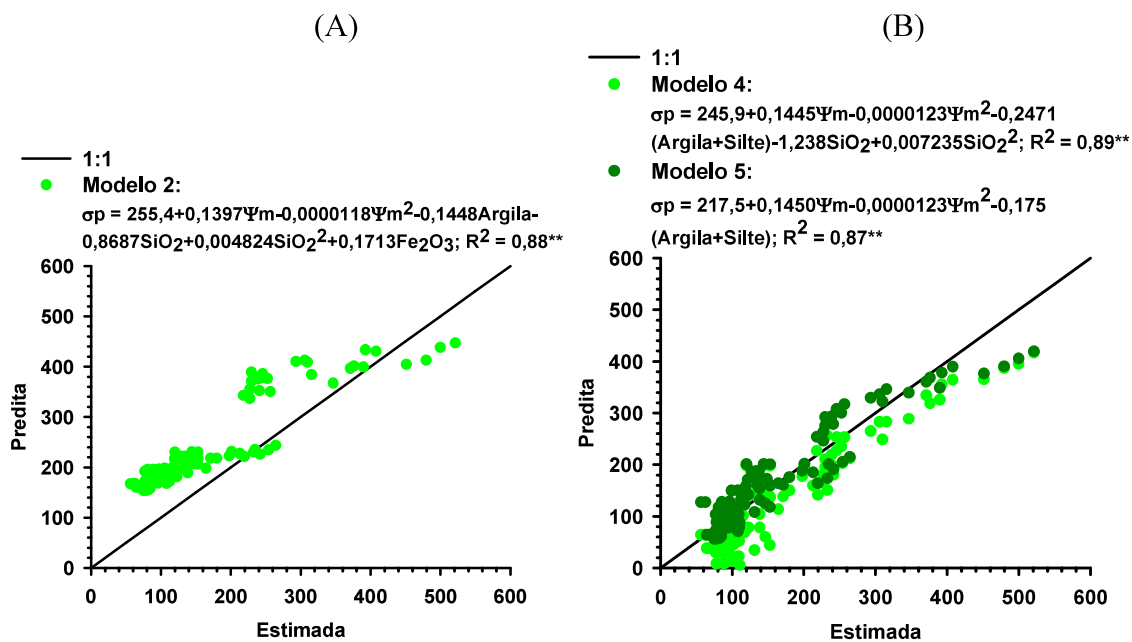


Figura 3. Representação dos valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) predita pelas funções de pedotransferência para todos os dados (A) e para o conteúdo de argila+silte (B), em relação aos valores estimados de solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.

Considerando a superfície de σ_p a partir do modelo 5 (Tabela 4) e com $R^2 = 0,87$ ($p < 0,01$), indicando bom poder explicativo (Figura 4), os resultados indicam um comportamento não linear da pressão de pré-consolidação, controlado principalmente pelo potencial matricial (Ψ_m) e, em menor magnitude, pela fração argila+silte.

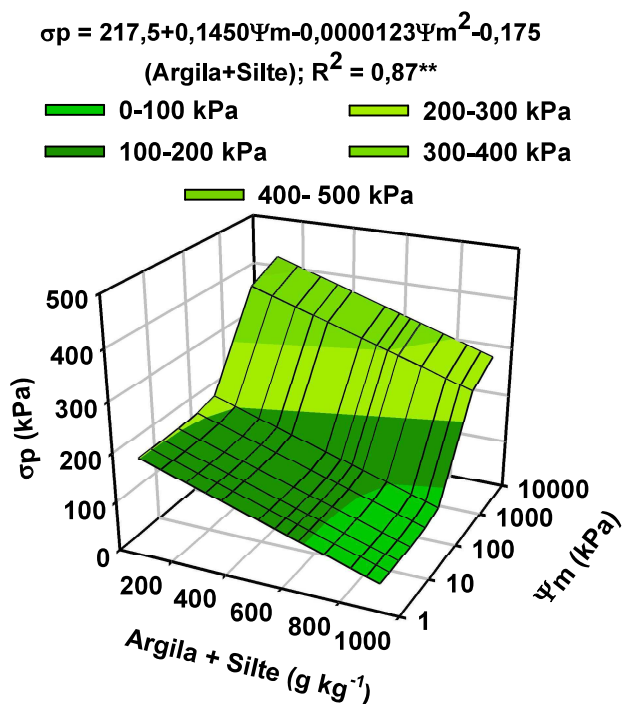


Figura 4. Pressão de pré-consolidação (σ_p) em função do potencial matricial (Ψ_m) e do teor de argila+silte em solos do estado de Goiás, Brasil, representativos de ambientes tropicais.

4. DISCUSSÃO

4.1. Composição física, química e mineralógica no comportamento compressivo dos solos estudados

Os atributos físicos avaliados apontam à heterogeneidade dos ambientes estudados (Tabela 2), cujos valores variaram de 1,14 (no caso de D_p) à 25 vezes (para Fe_2O_3) e que refletem, majoritariamente, a variabilidades dos solos tropicais por meio de atributos como textura, estrutura, densidade inicial e mineralogia da fração argila (Larson et al., 1980; Gupta et al., 1989; Dias Júnior, 1994; Assouline et al., 1997). O nosso estudo é oportuno, relevante e coerente com os apontamentos de Ajayi et al. (2009), que definiram bases para os estudos acerca do comportamento compressivo de solos tropicais. Diante da homogeneidade morfológica observada nesses solos, os autores destacam que as avaliações devem se concentrar nos horizontes diagnósticos subsuperficiais, em que a estrutura é verdadeiramente expressa e com menor influência antrópica [sob essa

premissa, assumem especial relevância os estudos de Reatto et al. (2009), Severiano et al. (2013) e Rezende et al. (2025)].

Nestes, os teores de carbono no solo (COT) são baixos, tendo no alto coeficiente de variação a relação direta com a argila. Por sua vez, D_p e óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) variam conforme as características do material de origem do solo. A partir das relações entre composição e comportamento compressivo, torna-se possível futuramente, por meio de estudos complementares nas camadas superficiais a quantificação dos efeitos decorrentes do uso e manejo e tendo, em estudos como este, bases e critérios de referência para a compreensão do solo em suas múltiplas funções.

Considerando a pressão de pré-consolidação (σ_p), em uma escala de avaliação cujos valores inferiores a 200 kPa são considerados baixos, pois são frequentemente superados pelas cargas aplicadas por máquinas agrícolas (Guimarães Junnyor et al., 2019); valores entre 200 e 400 kPa são classificados como moderados, enquanto aqueles superiores a 400 kPa são considerados altos, uma vez que conferem maior resistência do solo à compactação, tornando pouco provável a superação dessa pressão pelo maquinário; os nossos resultados apontam o risco iminente de ocorrência da compactação do solo, em particular quando da ocorrência do tráfego em condições de solo úmido (cujos valores são inferiores à 100 kPa - Tabela 2), situação muito comum nos cultivos de sequeiro no cerrado brasileiro em condições de concentração das chuvas dada a estacionalidade climática (Silva et al., 2021).

A expressiva amplitude textural observada [solos de classe areia ($\sim 70 \text{ g kg}^{-1}$ de argila) a muito argilosos ($> 800 \text{ g kg}^{-1}$); Figura 2] abrangem praticamente todo o gradiente textural encontrado em ambientes tropicais já descritos em literatura e, em particular, no Cerrado brasileiro (Reatto et al., 2009; Severiano et al., 2013; Rezende et al., 2025). A variabilidade observada reflete a heterogeneidade do material de origem e o avançado estágio de evolução das paisagens, conforme proposto por Curi e Franzmeier (1984). Em superfícies geomórficas antigas, que mantêm contrastes granulométricos de litologias distintas, como arenitos e rochas básicas, notadamente o basalto, tais contrastes são intensificados pelo elevado grau de intemperismo dos solos.

Como consequência, os teores de óxidos de ferro e alumínio nestes solos são elevados (afetando diretamente a magnitude de D_p) ao passo que os de silte são baixos e conferem conotação residual (Tabela 2), mas que, contraditoriamente apresentam-se elevados em métodos analíticos convencionais, como quando da determinação pela pipeta (Gee & Bauder, 1986) ou pelo hidrômetro (Bouyoucos, 1951). Por essa razão, optou-se

neste estudo, pela dispersão do solo por meio de energia ultrassônica, reconhecida como o método mais eficiente para promover a máxima desagregação destes materiais do solo (Silva et al., 2020).

Subsidia-se os nossos resultados, os teores inferiores de SiO_2 em relação à Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Tabela 2), sendo este um procedimento padrão em solos brasileiros para indicar o grau de intemperismo do solo (Santos et al., 2025) e um indicativo da composição mineralógica da fração argila (Reatto et al., 2009). Em ambientes tropicais, o avanço do intemperismo promove a dessilicatização progressiva, com remoção de sílica e concentração relativa de óxidos de ferro e alumínio, restando predominantemente óxidos de Fe e Al (termo que inclui óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos) e minerais resistentes (quartzo em predominância) na fração areia.

Os pontos aqui abordados implicam que os Latossolos e Neossolos Quartzarênicos se assemelham morfológicamente e ocorrem associados à paisagem, cuja estrutura *in situ* é do tipo maciça e altamente porosa em condição natural (Moura et al., 2021), com microestrutura muito pequena, conferindo à estes, elevada estabilidade estrutural e friabilidade. Assim, e mesmo em classes taxonômicas distintas, podem compartilhar semelhanças que reduzem o papel da mineralogia e da estrutura morfológica como fator diferenciador da resposta mecânica à aplicação de carga máquinas agrícolas e/ou pisoteio por animais quando da inserção no processo produtivo.

4.2. Desenvolvimento de Funções de pedotransferência para estimativa do comportamento compressivo de solos brasileiros representativos em ambientes tropicais

Os dois modelos de regressão múltipla para todos os dados dos atributos investigados, indicam a mesma capacidade preditiva de σ_p (Tabela 3), embora o modelo 2 seja vantajoso por reduzir uma variável independente (no caso, o silte; Figura 3A). Isto só é possível, sem dúvidas, devido ao fato de ter adotado na determinação analítica, a dispersão via dispersão ultrassônica. Rezende et al. (2025), modelando a compactação de solos tropicais brasileiros, fizeram implicações críticas acerca da característica predominantemente descritiva e não funcional do pseudossilte quando da determinação por procedimentos analíticos oficiais adotados no Brasil (Teixeira et al., 2017) e estes alinhados aos protocolos analíticos internacionais (Bouyoucos, 1951; Gee & Bauder, 1986). A compreensão acerca das alterações estruturais do solo depende, portanto, do método de determinação da textura, em que os tradicionais subestimam progressivamente

dos valores de referência limítrofes à medida que aumenta os teores de óxidos de ferro (ou alumínio) na fração argila.

No entanto, os autores tratam a sonificação de solos como um refinamento analítico não adotado em análises convencionais e permanecendo mais restrita à pesquisa científica. Como condição de contorno para a aplicabilidade dos métodos oficiais, apresentaram o uso do silte em somatório à argila, uma vez que essa fração é reconhecidamente instável durante a gênese dos Latossolos brasileiros, o que é incompatível com seu elevado grau de intemperismo (logo, o silte é uma partícula residual nestes solos), e naturalmente baixa em Neossolos Quartzarênicos. Assim, é possível observar pelos modelos descritos na tabela 4, a maior capacidade preditiva das funções de pedotransferência e, ainda, a aplicabilidade de resultados na compreensão do comportamento compressivo de solos tropicais por agricultores, técnicos e pesquisadores utilizando análises texturais realizadas em laboratórios de rotina.

Ao dispor de três etapas, possibilitamos definir dois modelos mais precisos (modelos 3 e 4) ou um simplificado (modelo 5) que, embora diferentes (modelos 3 e 4 x modelo 5 - Tabela 4) possuem capacidades preditivas muito semelhantes (Figura 3B). Assim, recomendamos a adoção do modelo 5 como a função de pedotransferência para estimar o comportamento compressivo de solos brasileiros representativos de ambientes tropicais, pelo menor número de variáveis independentes sem perda de precisão relevante.

Chama atenção o fato de o carbono orgânico total do solo (COT) não ter exercido efeito sobre a σ_p , sendo a literatura em solos tropicais ainda inconclusiva quanto a essa relação. Estudos têm relatado efeitos diretos (Oliveira et al., 2003; Mazurana et al., 2017) e inversos (Araújo-Junior et al., 2011; Toledo et al., 2021), bem como efeitos indiretos (Suravi et al., 2021) ou mesmo nulos (Freitas et al., 2018) deste componente sobre o comportamento compressivo. Tais influências podem ocorrer por meio de alterações na elasticidade e na compressibilidade do solo (Reichert et al., 2018), ou indiretamente, via modificações nas propriedades hidráulicas, nem sempre associadas a mudanças estruturais (Suravi et al., 2021).

A ausência do COT pode estar relacionada ao fato que em solos tropicais, os conteúdos de matéria orgânica são consideravelmente inferiores aos ambientes subtropicais/temperados, onde os efeitos são mais conhecidos. Ademais, quando utilizadas amostras de solos de horizontes subsuperficiais, assumimos as premissas de expressão das características intrínsecas sobre o comportamento compressivo do solo e evitamos, tanto quanto possível, teores consideráveis de matéria orgânica do solo, tendo

em vista a sua influência sobre os atributos analisados, como apontado por Severiano et al. (2013) e Rezende et al. (2025). Por fim, cabe ressaltar que a determinação do carbono orgânico foi realizada por oxidação via úmida (Walkley e Black, 1934) o que, segundo Madari et al. (2005), não é capaz de medir todas as formas de carbono do solo, particularmente formas altamente estáveis como o carvão. Recomenda-se, portanto, estudos complementares para o entendimento a matéria orgânica do solo em ambientes tropicais.

4.3. Suscetibilidade à compactação de solos brasileiros representativos de ambientes tropicais

A superfície de resposta evidencia o efeito do conteúdo de água no solo, quantificado pelo potencial matricial (Ψ_m), como o principal fator controlador da capacidade de suporte de carga em solos tropicais (Figura 4). Numa mesma condição de umidade, a textura do solo governa a deformação em decorrência de influência no arranjo do sistema poroso. A elevada variabilidade da pressão de pré-consolidação indica que a capacidade de suporte de carga é modulada pela umidade do solo e pelo arcabouço textural (Imhoff et al., 2004; Saffih-Hdadi et al., 2009; Esteban et al., 2020). Observa-se incremento da resistência mecânica que se eleva à medida que reduz o conteúdo de água, enquanto a suscetibilidade à compactação aumenta com o teor de argila.

Nossos resultados corroboram os obtidos por Severiano et al. (2013), que associaram o comportamento compressivo à textura e à dinâmica hídrica de Latossolos representativos dos solos mais antigos do planeta. Os valores de pressão de pré-consolidação revelam a suscetibilidade à compactação dos solos estudados, em que altos valores (> 400 kPa) são vistos somente em solos de textura franco-arenosa, ou mais grossa, e quando extremamente secos ($\Psi_m > 1.500$ kPa). Por outro lado, e em todas as outras situações, valores baixos (< 200 kPa) estão presentes em toda faixa úmida avaliada, isto é, nos solos franco argilo-arenosos ou mais fino e quando o conteúdo de água no solo indicar disponibilidade hídrica às plantas, é esperado a ocorrência de alguma compactação adicional. Tal comportamento é atribuído a uma característica intrínseca marcada pela estrutura porosa independentemente da classe textural.

Assim, os resultados reforçam a constatação de que os Latossolos brasileiros figuram entre os solos mais suscetíveis à compactação no mundo e que sua degradação

tende a ser praticamente inevitável. Isto porque as operações de tráfego agrícola concentram-se numa condição agrícola decorrente de até duas safras anuais durante o período chuvoso (outubro a março), sendo esperada a ocorrência generalizada da compactação independentemente do teor de água, uma vez que as pressões aplicadas excedem a capacidade de suporte do solo. De fato, este problema é amplamente observado nas regiões agrícolas do país, podendo ocorrer em magnitude superior à relatada em outras partes do mundo (Schjønning et al., 2015; Botta et al., 2018; Peixoto et al., 2020), tornando ainda mais relevante as pesquisas acerca da mitigação da compactação do solo.

5. CONCLUSÕES

As relações de regressão são viáveis para estimar a pressão de pré-consolidação a partir de atributos físicos comumente determinados em análises de caracterização ou são dados já disponíveis em levantamentos de solos. Em uma primeira análise utilizando todas os atributos, um modelo foi desenvolvido a partir de cinco variáveis independentes: ψ_m , Argila, Silte, SiO_2 e Fe_2O_3 , mas que após quatro etapas, simplificados para um modelo de regressão com apenas duas variáveis independentes, ψ_m e Argila+Silte, explicando 87% da variância de σ_p .

Estes modelos revelam a altíssima suscetibilidade à compactação dos solos tropicais brasileiros, aumentando em direção ao incremento do conteúdo de água e da ocorrência de frações finas (argila e silte). Apesar das diferenças de resistência, a capacidade de suporte de carga é baixa frente às pressões exercidas pelos maquinários agrícolas, tornando a ocorrência de compactação praticamente inevitável mesmo sob condições de trafegabilidade em solo parcialmente seco.

6. REFERÊNCIAS

- Ajayi, A., Dias Junior, M., Curi, N., Gontijo, I., Araujo Junior, C., & Vasconcelos Junior, A. (2009). Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. *Soil and Tillage Research*, 102(1), 14–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.013>
- Araujo-Junior, C. F., Guimarães, P. T. G., Dias Junior, M. de S., Alcântara, E. N., & Mendes, A. D. R. (2011). Alterações nos atributos químicos de um latossolo pelo manejo de plantas invasoras em cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 35(6), 2207–2217. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600036>
- Assouline, S., Tessier, D., & Tavares-Filho, J. (1997). Effect of Compaction on Soil Physical and Hydraulic Properties: Experimental Results and Modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2), 390–398. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100020005x>
- Beniaich, A., Otten, W., Shin, H.-C., Cooper, H. V., Rickson, J., Soulaïmani, A., & El Gharous, M. (2023). Evaluation of pedotransfer functions to estimate some of soil hydraulic characteristics in North Africa: A case study from Morocco. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1090688>
- Benites, V. M., Machado, P. L. O. A., Fidalgo, E. C. C., Coelho, M. R., & Madari, B. E. (2007). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139(1–2), 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986a). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Agronomy Monograph, N. 9* (2nd ed., pp. 363–375). ASA/SSSA.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986b). Particle density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Agronomy Monograph, N. 9* (2nd ed., pp. 377–382). ASA/SSSA.
- Botta, G. F., Tolón-Becerra, A., Bienvenido, F., Rivero, D., Laureda, D. A., Ezquerro-Canalejo, A., & Contessotto, E. E. (2018). Sunflower (<sc>Helianthus annuus </sc> L.) harvest: Tractor and grain chaser traffic effects on soil compaction and crop yields. *Land Degradation & Development*, 29(12), 4252–4261. <https://doi.org/10.1002/ldr.3181>
- Bouyoucos, G. J. (1951). A Recalibration of the Hydrometer Method for Making Mechanical Analysis of Soils ¹. *Agronomy Journal*, 43(9), 434–438. <https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090005x>
- Curi, N., & Franzmeier, D. P. (1984). Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 48(2), 341–346. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020024x>
- de Abreu Lima, R. C., & Lemos, F. K. (2023). *Brazilian Agriculture and the Global Environmental Agenda* (pp. 85–105). https://doi.org/10.1007/978-3-031-29853-0_5
- de Moura, M. S., Silva, B. M., Mota, P. K., Borghi, E., Resende, A. V. de, Acuña-Guzman, S. F., Araújo, G. S. S., da Silva, L. de C. M., de Oliveira, G. C., & Curi, N. (2021). Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and

- improve least limiting water range in a Ferralsol. *Agricultural Water Management*, 243, 106523. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106523>
- Deon, R. C., Zilli, D., Brandelero, G., & Goulart Machado, R. (2018). Compaction and water infiltration capacity of a Cambisol by the traffic of machines and cattle trampling. *Revista Ciência Agrícola*, 16(1), 77–84. <https://doi.org/10.28998/rca.v16i1.4088>
- Derpsch, R., Kassam, A., Reicosky, D., Friedrich, T., Calegari, A., Basch, G., Gonzalez-Sanchez, E., & dos Santos, D. R. (2024). Nature's laws of declining soil productivity and Conservation Agriculture. *Soil Security*, 14, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100127>
- De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., & Muys, B. (2005). Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating Bulk Density of Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(2), 500–510. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0500>
- Dias Junior, M. de S., Tassinari, D., & Martins, P. C. C. (2019). Compactação do solo: atualização. In *Tópicos em Ciência do Solo* (Vol. 10, pp. 7–69).
- Dias Junior, M. S. (1994). *Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic* [PhD thesis]. Michigan State University.
- Dias Junior, M. S., & Pierce, F. J. (1995). A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8(2), 139–151. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00015-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00015-8)
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., da Silva, R. B., de Souza Lima, E., Lovera, L. H., & de Oliveira, I. N. (2020). Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma*, 362, 114097. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>
- Farooq, U., Ajmal, M., Li, S., Yang, J., & Ullah, S. (2024). Evaluation of Pedotransfer Functions to Estimate Soil Water Retention Curve: A Conceptual Review. *Water*, 16(17), 2547. <https://doi.org/10.3390/w16172547>
- Freitas, J. A. S. de, Silva, V. R. da, Luz, F. B. da, Kaiser, D. R., & Zwirtes, A. L. (2018). Soil carbon and physical-mechanical properties after successive applications of swine and poultry organic waste. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(4), 390–398. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4852412>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). *Particle-size Analysis* (pp. 383–411). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Guimarães Júnnyor, W. da S., Diserens, E., De Maria, I. C., Araujo-Junior, C. F., Farhate, C. V. V., & de Souza, Z. M. (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of The Total Environment*, 681, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.009>

- Gupta, S. C., Hadas, A., & Schafer, R. L. (1989). Modeling Soil Mechanical Behavior During Compaction. In *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils* (pp. 137–152). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2421-5_12
- Imhoff, S., Da Silva, A. P., & Fallow, D. (2004). Susceptibility to Compaction, Load Support Capacity, and Soil Compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1), 17–24. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1700>
- IUSS Working Group WRB. (2006). *World Reference Base for Soil Resource* (2nd ed.). FAO.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde*. W. de Gruyter.
- Larson, W. E., Gupta, S. C., & Useche, R. A. (1980). Compression of Agricultural Soils from Eight Soil Orders. *Soil Science Society of America Journal*, 44(3), 450–457. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400030002x>
- Lopes, A. S., & Guimarães Guilherme, L. R. (2016). A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. *Advances in Agronomy*, 1–72. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- Madari, B. E., Reeves, J. B., Coelho, M. R., Machado, P. L. O. A., De-Polli, H., Coelho, R. M., Benites, V. M., Souza, L. F., & McCarty, G. W. (2005). Mid- and Near-Infrared Spectroscopic Determination of Carbon in a Diverse Set of Soils from the Brazilian National Soil Collection. *Spectroscopy Letters*, 38(6), 721–740. <https://doi.org/10.1080/00387010500315876>
- Marques, J. J., Schulze, D. G., Curi, N., & Mertzman, S. A. (2004). Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, 119(3–4), 179–195. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00260-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00260-X)
- Mayer, H., Mentler, A., Papakyriacou, M., Rampazzo, N., Marxer, Y., & Blum, W. E. H. (2002). Influence of vibration amplitude on the ultrasonic dispersion of soils. *International Agrophysics*, 16(1), 53–60.
- Mazurana, M., Levien, R., Inda Junior, A. V., Conte, O., Bressani, L. A., & Müller, J. (2017). Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(1), 60–71. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017411027216>
- Oliveira, G. C. de, Dias Junior, M. de S., Resck, D. V. S., & Curi, N. (2003). Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(2), 291–299. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200017>
- Peixoto, D. S., Silva, L. de C. M. da, Melo, L. B. B. de, Azevedo, R. P., Araújo, B. C. L., Carvalho, T. S. de, Moreira, S. G., Curi, N., & Silva, B. M. (2020). Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 745, 140887. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>

- Reatto, A., Bruand, A., de Souza Martins, E., Muller, F., da Silva, E. M., de Carvalho, O. A., Brossard, M., & Richard, G. (2009). Development and origin of the microgranular structure in latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. *CATENA*, 76(2), 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.003>
- Reichert, J. M., Mentges, M. I., Rodrigues, M. F., Cavalli, J. P., Awe, G. O., & Mentges, L. R. (2018). Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *CATENA*, 165, 345–357. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.014>
- Rezende, A. G., Souza, I. R. M. de, Fonseca, C. M., Delmod, J. G., Silva, E. A., Costa, K. A. de P., & Severiano, E. da C. (2025). Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: Implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions. *Geoderma*, 459, 117395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117395>
- Ribeiro, B. T., de Lima, J. M., Curi, N., de Oliveira, G. C., da Silva, É. A., & Silva, B. M. (2017). Ultrasonic Aggregate Breakdown of an Oxisol as Affected by Cavitation Intensity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 00103624.2017.1299170. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1299170>
- Sá, M. A. C. de, Lima, J. M. de, & Mello, C. R. de. (2002). Nível de energia ultra-sônica para estudo da estabilidade de agregados de um Latossolo sob diferentes usos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(11), 1649–1655. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001100017>
- Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y.-J., Tang, A.-M., & Chaplain, V. (2009). A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research*, 105(1), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.05.012>
- Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. A. de, Lumbrreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Araujo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. da. (2025). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (6. ed., rev. e ampl.). Embrapa.
- Santos, R. S., Wiesmeier, M., Cherubin, M. R., Oliveira, D. M. S., Locatelli, J. L., Holzschuh, M., & Cerri, C. E. P. (2021). Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. *Geoderma*, 400, 115149. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>
- Schaefer, C. E. G. R., Siqueira, R. G., Pereira, L. F., Gomes, L. de C., Almeida, P. H. A., Francelino, M. R., Firmino, F. H. T., de Souza, J. J. L. L., Ker, J. C., & Fernandes-Filho, E. I. (2025). Brazilian Latossolos (Ferralsols, Oxisols) from different biomes: a multiproxy study on the spatial variability of the most weathered tropical soils in South America. *Geoderma Regional*, 43, e01012. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e01012>
- Schjønning, P., Lamandé, M., De Pue, J., Cornelis, W. M., Labouriau, R., & Keller, T. (2023). *The challenge in estimating soil compressive strength for use in risk assessment of soil compaction in field traffic* (pp. 61–105). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.003>

- Schjøning, P., van den Akker, J. J. H., Keller, T., Greve, M. H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., & Breuning-Madsen, H. (2015). *Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective* (pp. 183–237). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001>
- Schmidt, M. W. I., Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (1999). Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils. *European Journal of Soil Science*, *50*(1), 87–94. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00211.x>
- Severiano, E. da C., César de Oliveira, G., Junior, M. de S. D., Curi, N., Costa, K. A. de P., & Carducci, C. E. (2013). Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, *51*(3), 193–202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Severiano, E. da C., Oliveira, G. C. de, Dias Júnior, M. de S., Costa, K. A. de P., Benites, V. de M., & Ferreira Filho, S. M. (2011). Structural changes in latosols of the cerrado region: II - soil compressive behavior and modeling of additional compaction. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *35*(3), 783–791. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300014>
- Silva, É. A. da, Reinert, D. J., Reichert, J. M., Mallmann, M. S., Pereira, M. A., Pons, S. S., & Foggiato, W. S. (2019). Soil conservation management with cover crops: effects on critical energy levels, release and dispersion of aggregates. *Bragantia*, *78*(3), 444–453. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20180323>
- Silva, J. F. G., Linhares, A. J. de S., Gonçalves, W. G., Costa, K. A. de P., Tormena, C. A., Silva, B. M., Oliveira, G. C. de, & Severiano, E. da C. (2021). Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? *Soil and Tillage Research*, *208*, 104873. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104873>
- Silva, S. H. G., Weindorf, D. C., Pinto, L. C., Faria, W. M., Acerbi Junior, F. W., Gomide, L. R., de Mello, J. M., de Pádua Junior, A. L., de Souza, I. A., Teixeira, A. F. dos S., Guilherme, L. R. G., & Curi, N. (2020). Soil texture prediction in tropical soils: A portable X-ray fluorescence spectrometry approach. *Geoderma*, *362*, 114136. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114136>
- Souza, G. da S. e, Gomes, E. G., Alves, E. R. de A., & Gasques, J. G. (2020). Technological progress in the Brazilian agriculture. *Socio-Economic Planning Sciences*, *72*, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100879>
- Suravi, K. N., Attenborough, K., Taherzadeh, S., Macdonald, A. J., Powlson, D. S., Ashton, R. W., & Whalley, W. R. (2021). The effect of organic carbon content on soil compression characteristics. *Soil and Tillage Research*, *209*, 104975. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104975>
- Taurozzi, J. S., Hackley, V. A., & Wiesner, M. R. (2011). Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment – issues and recommendations. *Nanotoxicology*, *5*(4), 711–729. <https://doi.org/10.3109/17435390.2010.528846>
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics* (1st ed.). John Wiley & Sons.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed.).

- Toledo, M. P. S., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Ortiz, Pedro. F. S., & Cherubin, M. R. (2021). Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils. *Soil and Tillage Research*, 212, 105072. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105072>
- Torres, L. C., Nemes, A., ten Damme, L., & Keller, T. (2024). Current limitations and future research needs for predicting soil precompression stress: A synthesis of available data. *Soil and Tillage Research*, 244, 106225. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106225>
- United States Department of Agriculture. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (Vol. 12). Soil Conservation Service.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, X., Ma, L., Yan, S., Chen, X., & Grove, A. (2023). Trade for Food Security: The Stability of Global Agricultural Trade Networks. *Foods*, 12(2), 271. <https://doi.org/10.3390/foods12020271>
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1), 2501. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>

CAPÍTULO II

RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO: EFICÁCIA DESTE INDICADOR NA DIAGNOSE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS TROPICAIS

Resumo: A compactação do solo constitui uma das principais limitações da agropecuária tropical em todo o mundo; entretanto, sua diagnose ainda permanece desafiadora em razão das limitações inerentes aos indicadores utilizados em sua avaliação. Este estudo teve como objetivo avaliar a resistência do solo à penetração na diagnose da compactação do solo em sistemas agropecuários tropicais. Foram avaliadas 199 lavouras comerciais distribuídas em três projetos de campo nas várias regiões agrícolas no Brasil e no Paraguai, abrangendo ampla diversidade textural e edafoclimática. A penetrometria in situ contemplou a avaliação da profundidade da camada impeditiva e da resistência à penetração (RP, MPa), enquanto em condições laboratoriais controladas avaliadas em amostras indeformadas de solo, a RP, densidade do solo relativa (Dsrel), porosidade total (PT) e distribuição do sistema poroso (macroporos e microporos). Os resultados de campo indicaram alta frequência de valores restritivos de RP campo, mais concentrados, porém, predominantemente nas camadas rasas, evidenciando que eventuais restrições mecânicas nestes ambientes constituem um problema de superficial. Já para a diagnose em laboratório, a análise multivariada revelou o efeito da textura do solo nos atributos avaliados. A RP laboratório apresentou relações com Dsrel, com elevada coerência diagnóstica, não observada para RP campo em que além da ausência de relação causal com a Dsrel apresenta tendência à superestimação do impedimento mecânico. Conclui-se que a diagnose da compactação do solo em ambientes tropicais requer uma abordagem integrada entre a anamnese de campo e as avaliações laboratoriais, de modo a proporcionar interpretações agronômicas mais robustas e decisões de manejo mais precisas. A resistência à penetração deve ser interpretada como um indicador funcional complementar, especialmente em avaliações de campo, a fim de reduzir o risco de falsos diagnósticos e subsidiar decisões de manejo mais eficientes e agronomicamente justificáveis. A compactação do solo constitui uma condição estrutural amplamente disseminada em sistemas agropecuários tropicais e, embora concentrada em camadas

superficiais, pode restringir o crescimento radicular e comprometer a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Palavras-chave: Densidade do solo relativa, Porosidade do solo, Impedimento mecânico do solo, Qualidade física do solo, Latossolo, Neossolo Quartzarênico.

PENETRATION RESISTANCE: EFFECTIVENESS OF THIS INDICATOR IN DIAGNOSING SOIL COMPACTION IN TROPICAL AGRICULTURAL SYSTEMS.

Abstract: Soil compaction is one of the main limitations of tropical agriculture worldwide; however, its diagnosis remains challenging due to the inherent limitations of the indicators used in its evaluation. This study aimed to evaluate soil penetration resistance in the diagnosis of soil compaction in tropical agricultural systems. One hundred and ninety-nine commercial crops distributed across three field projects in various agricultural regions of Brazil and Paraguay were evaluated, encompassing a wide textural and edaphoclimatic diversity. In situ penetrometry assessed the depth of the impeding layer and penetration resistance (PR, MPa), while under controlled laboratory conditions, PR, relative soil density (Dsrel), total porosity (TP), and pore system distribution (macropores and micropores) were evaluated in undisturbed soil samples. Field results indicated a high frequency of restrictive field penetration resistance (PR) values, more concentrated, but predominantly in shallow layers, showing that any mechanical restrictions in these environments constitute a surface problem. For laboratory diagnosis, multivariate analysis revealed the effect of soil texture on the evaluated attributes. Laboratory PR showed relationships with soil surface resistance (Dsrel), with high diagnostic coherence, not observed for field PR, which, in addition to the absence of a causal relationship with Dsrel, shows a tendency to overestimate mechanical impediment. It is concluded that the diagnosis of soil compaction in tropical environments requires an integrated approach between field history and laboratory evaluations, in order to provide more robust agronomic interpretations and more precise management decisions. Penetration resistance should be interpreted as a complementary functional indicator, especially in field evaluations, in order to reduce the risk of false diagnoses and support more efficient and agronomically justifiable management decisions. Soil compaction is a widespread structural condition in tropical agricultural systems and, although concentrated in surface layers, can restrict root growth and compromise the sustainability of production systems.

Keywords: Relative soil bulk density, Soil porosity, Soil mechanical impedance, Soil physical quality, Latossolo, Neossolo Quartzarênico.

1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo representa uma preocupação em muitas regiões do mundo (Jabro et al., 2021), sendo reconhecida como um dos principais fatores limitantes da fertilidade do solo relacionado a qualidade física e o desenvolvimento das plantas, afetando processos essenciais como infiltração de água, aeração, disponibilidade de nutrientes e crescimento das raízes (Ben Hassen et al., 2020; Elaoud et al., 2025). Em razão de sua relevância agrônômica e ambiental, diversos indicadores têm sido empregados para o diagnóstico da compactação, destacando-se a resistência do solo à penetração (RP) amplamente utilizada em todo o mundo (Benevenuto et al., 2020; Dörner et al., 2022; Kumi et al., 2023) em função de sua simplicidade operacional, rapidez de obtenção de dados e viabilidade para avaliações pontuais em campo (Dexter et al., 2007; Vaz et al., 2022), consolidando-se como uma ferramenta para a estimar o impedimento mecânico do solo ao crescimento radicular (Strock et al., 2022).

Apesar dessas vantagens, a RP apresenta limitações relevantes, sobretudo quando utilizada de forma isolada. Isto porque é altamente dependente de atributos físicos do solo, como textura, estrutura, densidade e teor de água, além de ser influenciada pela variabilidade espacial e temporal, especialmente em ambientes tropicais, cujos solos apresentam elevada heterogeneidade morfológica, práticas de manejo específicas aos cultivos e marcante sazonalidade climática (Silva et al., 2016; Batista et al., 2024; Hu et al., 2025). Como consequência, a aplicabilidade dos resultados torna-se restrita, fazendo com que as avaliações em campo sejam contínuas e padronizadas sob condições hídricas a fim de reduzir vieses interpretativos (Rathnayake et al., 2025).

A interpretação da RP é ainda dificultada pela ausência de um valor crítico universalmente aceito a partir do qual o crescimento radicular seja significativamente restringido. Embora o limiar clássico de 2,0 MPa proposto por Taylor et al. (1966) seja amplamente utilizado, intervalos entre 2,0 e 3,0 MPa são frequentemente reportados (Dexter et al., 2007) assim como valores mais elevados, entre 3 e 4 MPa, dependendo da cultura, do sistema de manejo e das condições edafoclimáticas (Silva et al., 2021; Souza et al., 2022). Essa variabilidade limita a interpretação da RP quando baseada exclusivamente em valores absolutos em função das diferenças entre espécies e cultivares, das condições experimentais e da presença de rotas preferenciais no solo (Bengough et al., 2011; Kuhwald et al., 2020).

Além das limitações instrumentais, fatores ambientais podem amplificar a divergência entre RP e a real condição estrutural do solo, limitando a comparação de medições realizadas em condições distintas (Silva et al., 2016; Hu et al., 2025). Embora valores de referência de RP sejam fundamentais para subsidiar diagnósticos físicos precisos, sua efetividade depende diretamente da padronização das medições. Leituras imprecisas podem induzir a interpretações equivocadas e comprometer a correta indicação de intervenções agrônômicas e ambientais, com implicações diretas para a saúde do solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas (Klonowski et al., 2024; Lima et al., 2025).

Apesar do amplo número de estudos que investigam os efeitos do manejo sobre a resistência do solo à penetração (Mohieddinne et al., 2019; Kuhwald et al., 2020; Reichert et al., 2021; Suzuki et al., 2024; Sun et al., 2026), ainda são escassas as abordagens que tratam explicitamente das fontes de erro e das incertezas associadas à sua estimativa, especialmente aquelas relacionadas aos procedimentos de medição em campo e laboratório (Hu et al., 2025). Considerando que a resistência do solo é uma propriedade complexa, influenciada por múltiplos fatores físicos, estruturais e ambientais (Kumi et al., 2023), parte-se da hipótese de que a resistência à penetração, quando utilizada como indicador isolado, apresenta baixa robustez diagnóstica para representar o estado estrutural do solo em ambientes tropicais heterogêneos.. Assim, o objetivo deste estudo é caracterizar o impedimento mecânico do solo em profundidade, considerando seus condicionantes físicos e as implicações diagnósticas da resistência à penetração obtida em campo e em laboratório em agroecossistemas tropicais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Identificação e caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado a partir de amostras de solos coletadas em áreas agrícolas de fazendas tropicais dedicadas à produção de cultivos anuais (culturas de ciclo curto e/ou temporárias), predominantemente inseridas no bioma Cerrado e, ainda, Pantanal, Amazônia, Caatinga e Mata Atlântica do continente sul-americano. A pesquisa abrangeu 199 propriedades rurais, distribuídas em três projetos específicos, localizadas nos estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso,

Goiás, Bahia, Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Rondônia e Roraima, além do Distrito Federal, Brasil, além de áreas agrícolas no Paraguai (Figura 1).

A classificação climática, segundo Köppen (1931), é predominantemente megatérmica, pertencendo majoritariamente ao grupo Tropical Úmido, do tipo Savana (Aw), caracterizado por inverno seco, verão chuvoso, temperatura média anual em torno de 25 °C e precipitação média anual de aproximadamente 1.500 mm. Entretanto, ocorrem transições para regiões com clima do tipo Monção (Am), que apresenta elevadas temperaturas ao longo de todo o ano, com média anual próxima de 26 °C, precipitação média anual superior a 2.000 mm e regime de chuvas concentrado entre abril e agosto, especialmente no norte do Brasil. Além disso, observa-se a presença de áreas pertencentes ao grupo Temperado, subtipo Subtropical Úmido (Cfa), caracterizado por inverno frio e seco, estação chuvosa bem definida nas demais épocas do ano, temperatura média anual de cerca de 21 °C e precipitação média anual superior a 1.600 mm, predominante na região Sul do Brasil.

2.2. Protocolo de campo dos projetos englobados e amostragem de solo

As avaliações de campo e as coletas de amostras de solo foram realizadas no âmbito de três projetos de pesquisa correlatos, descritos a seguir:

- 1. Projeto de avaliação da qualidade física de solos brasileiros e paraguaios (BR/PY): as avaliações de campo foram conduzidas com três repetições, abrangendo 144 lavouras distribuídas nos estados brasileiros supracitados, bem como áreas agrícolas localizadas no Paraguai;

- 2. Projeto de avaliação da qualidade física de solos sob agricultura regenerativa (Regenera; <https://www.forum dofuturo.org/regenera-cerrado>): as avaliações foram realizadas com quatro repetições em 10 lavouras, localizadas em propriedades rurais dos municípios de Rio Verde e Montividiu, no estado de Goiás;

- 3. Projeto de avaliação da saúde do solo em lavouras de alta performance da cultura da soja (Saúde): as avaliações foram realizadas com cinco repetições em 45 lavouras, situadas em propriedades do sudoeste do estado de Goiás, cujos desempenhos agronômicos superam as médias regional, nacional e dos principais países produtores de soja no mundo.

Os pontos amostrais foram definidos com o auxílio de um sistema de posicionamento global (GPS), e a distribuição espacial das propriedades avaliadas é apresentada na Figura 1.

As amostragens foram realizadas nas safras 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024, em lavouras comerciais de cultivos anuais e durante o desenvolvimento de plantas de ciclo curto. As áreas eram recobertas com destaque para os Latossolos e os Neossolos Quartzarênicos, mas também ocorrência campos sob Cambissolos, Argissolos, Nitossolos, Plintossolos e Gleissolos, classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2025).

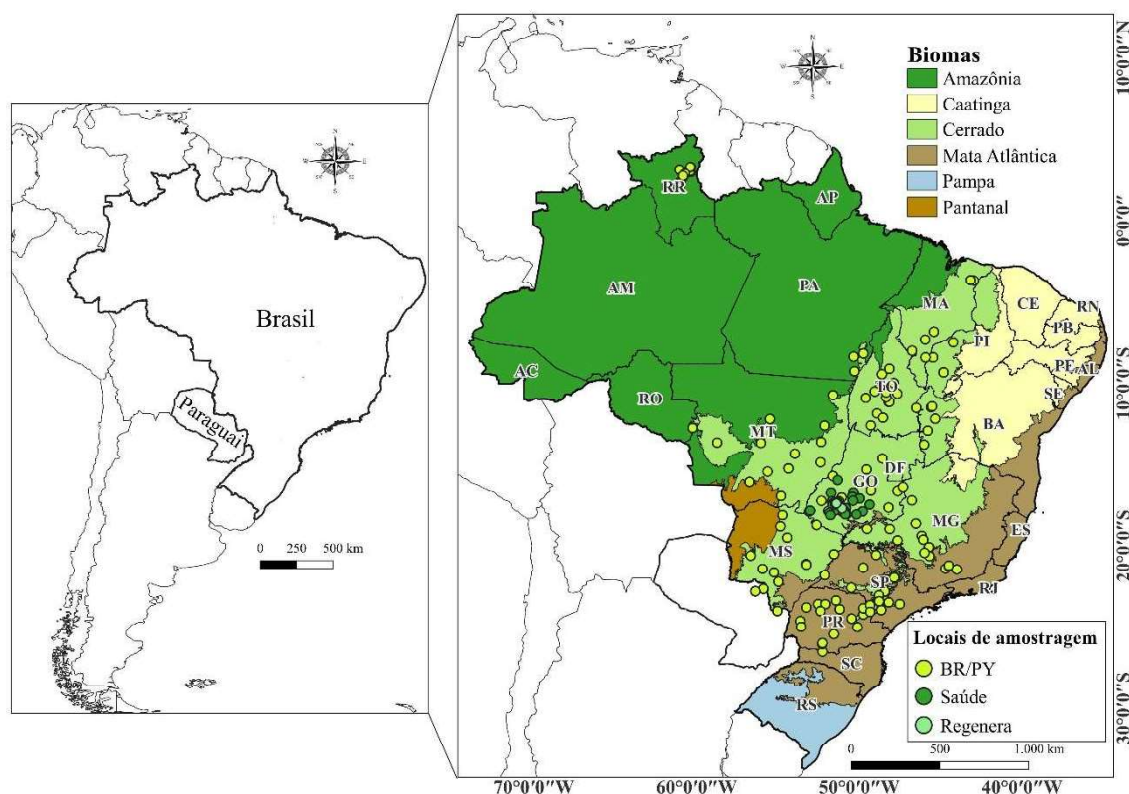


Figura 1. Mapa político da América do Sul com os pontos representando os locais de amostragem em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde).

Na ocasião, foi realizado o teste de penetrometria com o auxílio de um penetrômetro de impacto (Stolf et al., 1983), durante o ciclo das culturas de sequeiro e estando os solos com umidade na condição de friabilidade, e avaliando-o até 0,6 metros de profundidade, o qual possibilitou a apresentação de uma proposição de classificação

dos impactos camadas de solo com ocorrência de impedimento mecânico, conforme a profundidade diagnóstica em:

- Camada superficial (0 a 0,1 m de profundidade), para expressar a interface solo-atmosfera;

- Camadas rasa (0,1 a 0,2 m) e rasa-moderada (0,2 a 0,3 m), para expressar as afetadas por processos biológicos ocorridos no solo como respostas ao manejo agropecuário tropical (Silva et al., 2019);

- Camada profunda-moderada (0,3 a 0,5 m), em que ainda há impacto do manejo de produção de grãos sobre a estrutura do solo (Oliveira et al., 2004) e;

- Camada profunda (abaixo de 0,5 m de profundidade), praticamente livre dos impactos do manejo, expressando majoritariamente a gênese do solo.

Após a identificação das camadas com maior impedimento mecânico, foram coletadas uma amostra deformada de solo (aproximadamente 1 kg) e uma amostra indeformada, obtida em anel volumétrico metálico com 5,7 cm de diâmetro e 6,0 cm de altura, com o auxílio de um macaco hidráulico, totalizando 1.394 amostras (144 áreas × 2 amostras × 3 repetições no Projeto 1; 10 áreas × 2 amostras × 4 repetições no Projeto 2; e 45 áreas × 2 amostras × 5 repetições no Projeto 3).

2.3. Procedimentos laboratoriais de análises físico-hídricas do solo

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano, Câmpus Rio Verde e, inicialmente preparadas retirando o solo excedente ao volume dos cilindros, que 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 do solo (termo utilizado neste trabalho para se referir à distribuição das partículas por tamanho da fração mineral). A análise textural foi realizada por meio de agitação lenta (50 rpm) durante 16 horas, com adição de 20 g de areia grossa (1,00-2,00 mm) para promover a dispersão física, seguindo as recomendações de Oliveira, (2002), como dispersante químico, utilizou-se NaOH 1 N, mantido em contato com a amostra por 24 horas.

As partículas da fração areia (diâmetro entre 2,00 e 0,05 mm) foram quantificadas por tamisagem, enquanto as frações silte (0,05-0,002 mm) e argila ($< 0,002$

mm) foram determinadas por sedimentação diferencial, utilizando o método da pipeta, conforme a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

As amostras indeformadas foram inicialmente preparadas mediante a remoção do solo excedente ao volume dos cilindros e processadas conforme a seguinte marcha analítica:

I. organização das áreas em 15 baterias de aproximadamente 45 amostras, com base na textura do solo;

II. saturação das amostras por elevação gradual da lâmina de água, durante 48 h;

III. estabelecimento do equilíbrio nos potenciais matriciais (Ψ_m) de -6 kPa, em mesa de tensão automatizada, para determinação da microporosidade do solo (Micro) (Teixeira et al., 2017);

IV. realização do teste de penetrometria de bancada com o solo na capacidade de campo, utilizando penetrômetro de bancada MARCONI MA-933, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de aquisição de dados, conforme Severiano et al., (2011);

V. secagem das amostras em estufa a 105 °C, por 48 horas, para determinação da porosidade total e densidade do solo (Teixeira et al., 2017).

A porosidade total (PT) foi determinada pela equação 1. 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.

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

2.4. Tratamento estatístico dos resultados

Os resultados de resistência do solo à penetração (MPa) obtidas em campo, bem como a identificação da camada de máximo impedimento mecânico (m) foram submetidos à análise de estatística descritiva de posição (amplitude e distribuição de frequência).

Os resultados obtidos nas amostras indeformadas 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 ($r > |0,70|$), quando constatadas significância.

A densidade do solo relativa (Dsrel), calculada pela equação 2, foi utilizada para avaliar as alterações estruturais pela compactação do solo, conforme instruções de Håkansson (1990).

$$Dsrel = Ds/Dsref \quad \text{Eq. 2}$$

Em que Dsref é a Ds limitante (Dsl) às funções edáficas [indicador ecológico e agrônômico, segundo Severiano et al. (2011)] do solo alcançada quando valor de Ds correspondente à macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Vomocil & Flocker, 1961) e sendo obtida das funções de pedotransferência (FPTs) propostas por Rezende et al. (2025).

Com objetivo de verificar as variáveis afetadas pela compactação do solo, foi realizada a análise de trilha considerando a Dsrel a variável dependente e os atributos avaliados como variáveis independentes. Para definição da relação 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 e não constituindo problema para a análise. Em adição, as contribuições dos efeitos diretos e indiretos das variáveis foram quantificadas percentualmente (Ribeiro et al., 2019).

Para comparação entre os ajustes das regressões lineares da RP, medidas em campo e em laboratório, em função da Dsrel, foi utilizado o procedimento estatístico de Snedecor & Cochran (1989), que testa a homogeneidade dos dados (F) e a significância dos coeficientes angular (*b*) e linear (*a*) das equações de regressão. Por fim, estes valores de RP e Dsrel foram submetidos à análise de correlação de Pearson num gráfico em que se testa a acuracidade da diagnose da compactação medida em campo e em laboratório.

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a distribuição da resistência à penetração (RP), considerando todas as 199 áreas, evidenciando a ampla heterogeneidade nos valores observados. A maioria das áreas apresentou resistência à penetração na faixa de 2,0 a 6,0 MPa, correspondendo a 82% do total amostral (163 propriedades). Valores inferiores a 2,0 MPa

foram registrados em apenas 2% das propriedades, indicando baixa frequência dessa classe no conjunto avaliado. Por sua vez, valores superiores a 6,0 MPa ocorreram em 8% das áreas analisadas, representando classes de resistência elevada, porém com frequência inferior em relação ao total das propriedades.

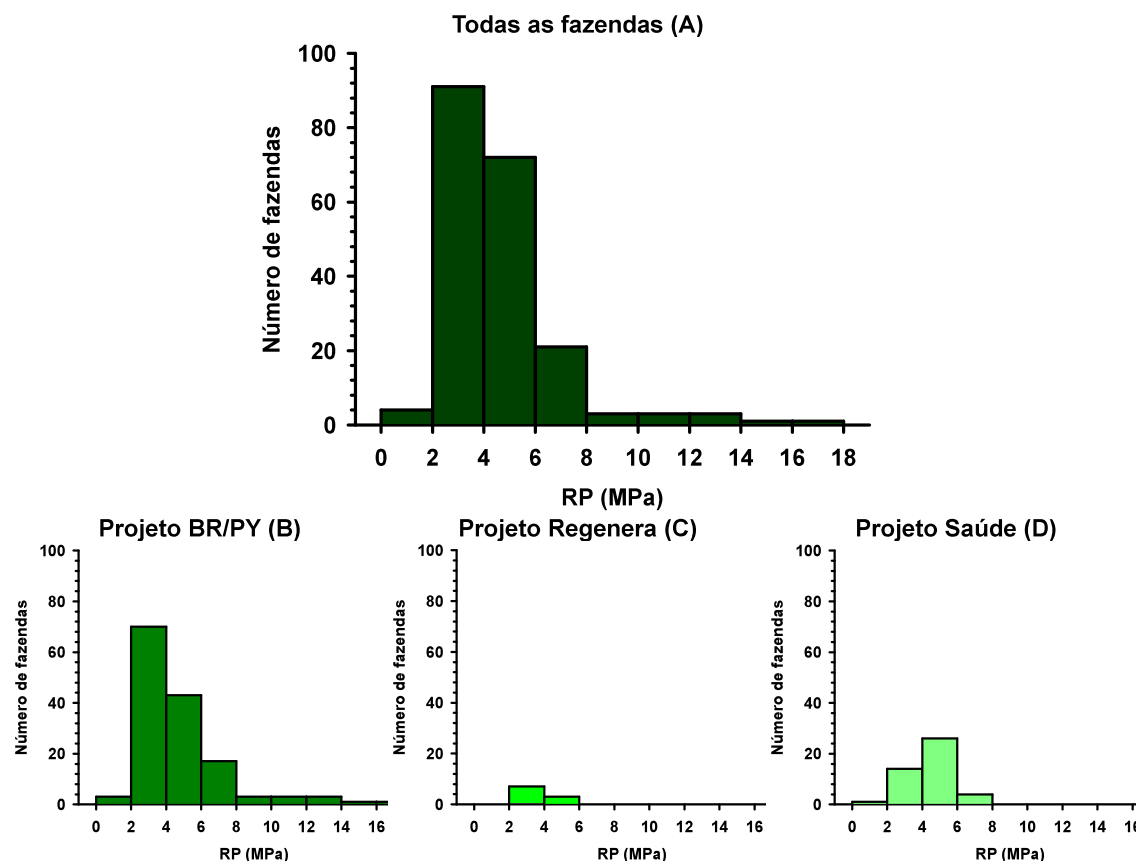


Figura 2. Histograma de frequência da resistência do solo à penetração (MPa) em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais (A), e nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY) (B), de agricultura regenerativa (Regenera) (C) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás, Brasil (Saúde) (D).

Os projetos BR/PY, Regenera e Saúde apresentaram padrões semelhantes na distribuição dos intervalos de resistência à penetração, com predominância de RP na faixa de 2,0 a 6,0 MPa, correspondendo a 79%, 100% e 89% das propriedades, respectivamente.

A avaliação *in situ* da camada impeditiva (Figura 3) evidenciou a ocorrência de condições contrastantes ao longo do perfil do solo em curta escala espacial (até 0,6 m de profundidade), com os maiores impedimentos mecânicos concentrados predominantemente em camadas rasas (0,10-0,20 m) e imediatamente abaixo da superfície, seguidas pela camada rasa-moderada (0,20-0,30 m); em conjunto, essas

respondem por 78,4% das ocorrências de máxima resistência à penetração nas propriedades avaliadas.

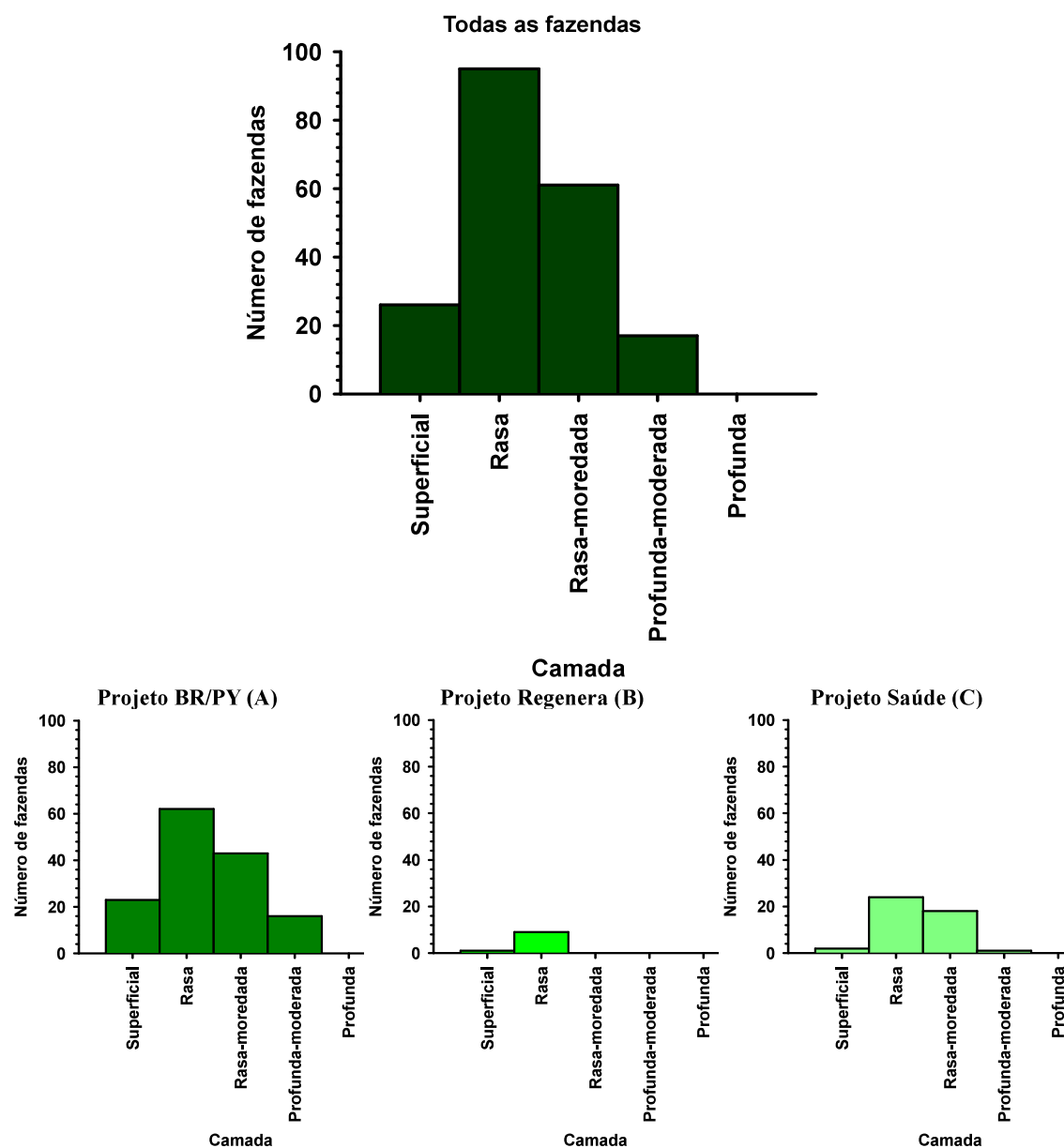


Figura 3. Histograma de frequência da camada de maior impedimento mecânico (m) em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais (A) e nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY) (B), de agricultura regenerativa (Regenera) (C) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde) (D).

Em menor proporção, a camada profunda-moderada corresponde a 8,5% das lavouras avaliadas, sendo registradas em maiores proporções em fazendas localizadas em estados nos biomas Amazônia (23,5% das áreas de Roraima), Mata Atlântica (23,5% nas fazendas de São Paulo) e, em menores proporções, em áreas do projeto Saúde (Figura 3).

Nenhuma das 199 fazendas avaliadas apresentou o maior impedimento na camada profunda (isto é, abaixo de 0,50 m de profundidade).

A análise conjunta dos resultados indica a camada rasa como a de maior impedimento mecânico. Nos projetos BR/PY e Saúde, observou-se também participação expressiva da camada rasa-moderada, enquanto no projeto Regenera as ocorrências são todas na camada rasa. A presença de impedimentos em camadas mais profundas foi registrada apenas em BR/PY, ainda que em baixa frequência, sendo ausente nos projetos Regenera e Saúde.

A Figura 4 apresenta a distribuição do número de fazendas em função da camada de maior impedimento mecânico em solos com morfologia latossólica (172 fazendas) e em solos indiscriminados (27 fazendas). Nos solos com morfologia latossólica, o maior impedimento mecânico concentrou-se predominantemente nas camadas mais próximas à superfície, representando 96% das ocorrências (13% na camada superficial, 52% na camada rasa e 31% em rasa-moderada), com distribuição mais restrita em profundidade ao longo do perfil do solo (4%).

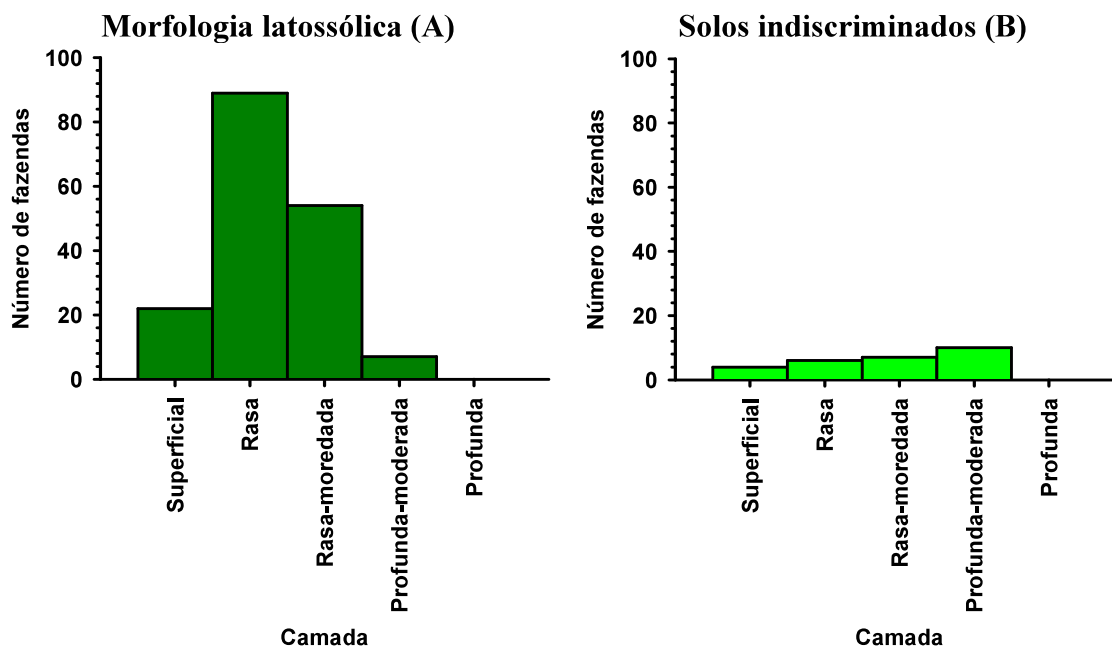


Figura 4. Histograma de frequência da camada de maior impedimento mecânico (m) em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais agrupadas em solos com morfologia de latossólica (A) e em solos indiscriminados (B).

Em contraste, nos solos indiscriminados, a distribuição do maior impedimento mecânico mostrou-se mais heterogênea entre as camadas avaliadas, com ocorrências nas camadas superficial (14,81%), rasa (22,22%) e rasa-moderada (25,93%), além de maior

frequência na camada profunda-moderada (37,04%) em comparação aos solos com morfologia latossólica. Embora o número absoluto de áreas nesse grupo seja menor, observa-se maior participação relativa das camadas mais profundas na distribuição do impedimento mecânico.

A estatística descritiva dos atributos físicos avaliados em amostras indeformadas de solos das fazendas tropicais sob cultivo anual está apresentada na Tabela 1. Observou-se ampla variabilidade na distribuição granulométrica, com valores médios de areia e argila semelhantes (417 g kg⁻¹ e 461 g kg⁻¹, respectivamente), mas apresentando amplitude entre 4 e 912 g kg⁻¹ para areia e 66 a 901 g kg⁻¹ para argila. Os coeficientes de variação excederam 50% para todas as frações granulométricas (Tabela 1), ao passo que a Dp, cujo valor médio foi de 2,65 kg dm⁻³, teve baixa variabilidade (CV=4%). Ds, por sua vez, variou entre 1,03 e 1,89 kg dm⁻³ e apresentou CV de 16%, refletindo na PT, entre 0,28 e 0,63 dm³ dm⁻³. A Micro apresentou média de 0,36 dm³ dm⁻³ (CV=23%), enquanto a Macro apresentou valores médios inferiores (0,10 dm³ dm⁻³), com valores mínimos de 0,02 dm³ dm⁻³ e elevada variabilidade (CV=56%). A RP realizada na capacidade de campo apresentou valor médio de 2,08 MPa, com variação entre 0,67 e 3,49 MPa e coeficiente de variação de 25% (Tabela 1).

Tabela 1. Momentos estatísticos de atributos físicos do solo, obtidos em laboratório, em 199 fazendas tropicais de produção de cultivos anuais no Brasil e Paraguai.

Atributo	Unidade	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	Coefficiente de Variação (%)	Mínimo	Máximo
Areia	g kg ⁻¹	417	273	19	65	4	912
Silte	g kg ⁻¹	122	92	7	76	7	559
Argila	g kg ⁻¹	461	232	16	50	66	901
Dp	kg dm ⁻³	2,65	0,10	0,01	4	2,49	3,14
Ds	kg dm ⁻³	1,44	0,23	0,02	16	1,03	1,89
PT	dm ³ dm ⁻³	0,46	0,09	0,01	19	0,28	0,63
Micro	dm ³ dm ⁻³	0,36	0,08	0,01	23	0,19	0,51
Macro	dm ³ dm ⁻³	0,10	0,05	0,01	56	0,02	0,26
RP	MPa	2,08	0,52	0,04	25	0,67	3,49

Dp: Densidade de partículas; Ds: Densidade do solo; PT: porosidade total; Micro: microporosidade; Macro: macroporosidade do solo; RP: resistência do solo à penetração na capacidade de campo.

A análise de componentes principais (PCA) aplicada aos atributos físicos do solo explicou 87% da variabilidade total dos dados em duas dimensões, sendo 56% atribuídos à primeira (Dim1) e 31% à segunda (Dim2) (Figura 5). A Dim1 constituiu o principal eixo de variação, sendo definida principalmente pela PT e Ds, que apresentaram as maiores contribuições e vetores orientados em direções opostas no biplot, indicando correlação negativa entre si. A Dim2 foi definida principalmente pelas variáveis RP e Macro.

A dispersão bidimensional dos escores não diferenciou os projetos (Figura 5A) mas ressaltou a hierarquização da textura sobre os atributos avaliados, explicitado na Figura 5B. O projeto BR/PY, assim como os solos de textura arenosa e média, apresentou maior associação com Ds, posicionando-se predominantemente no lado direito do biplot. Em contraste, os projetos Saúde e Regenera, assim como os solos argilosos e muito argilosos, apresentaram maior associação com Macro e menores valores de RP, posicionando-se no lado esquerdo do biplot.

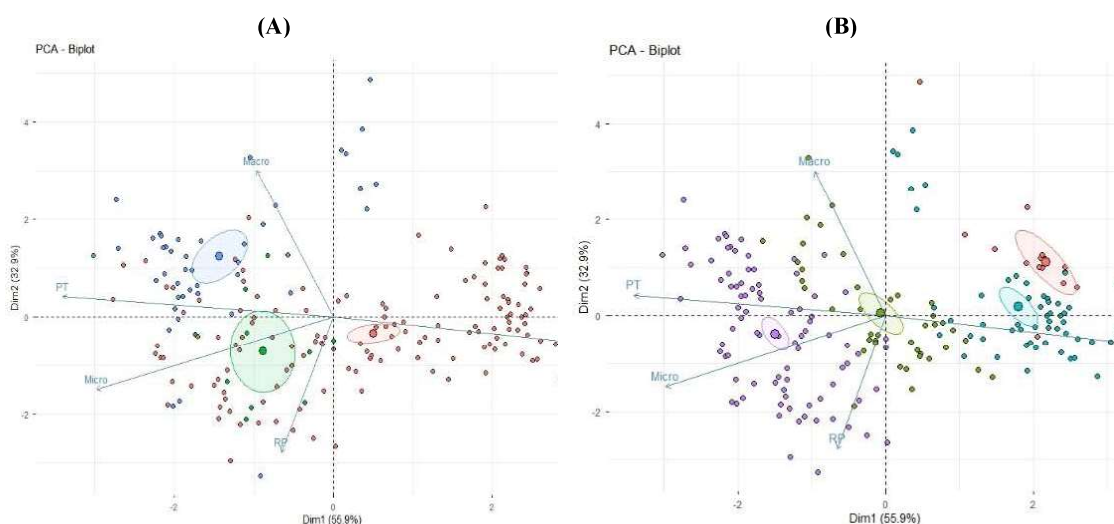


Figura 5. Dispersão bidimensional dos escores da análise de componentes principais dos atributos físicos do solo obtidos em laboratório, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde) (A), também em função da textura do solo (B). Textura arenosa: argila < 150 g kg⁻¹; Textura média: 150 g kg⁻¹ < argila < 350 g kg⁻¹; Textura argilosa: 350 g kg⁻¹ < argila < 600 g kg⁻¹; Textura muito argilosa: argila > 600 g kg⁻¹; Ds: Densidade do solo (kg dm⁻³); PT: porosidade total (dm³ dm⁻³); Micro: microporosidade do solo (dm³ dm⁻³); Macro: macroporosidade do solo (dm³ dm⁻³); RP: resistência do solo à penetração (MPa).

A contribuição das variáveis para a estruturação da PCA é apresentada na Figura 6, indicando que a Dim1 foi definida principalmente pela contribuição de PT > Ds >

Micro, enquanto a Dim2 foi influenciada principalmente por Macro > RP, conforme a magnitude e orientação dos vetores no biplot.

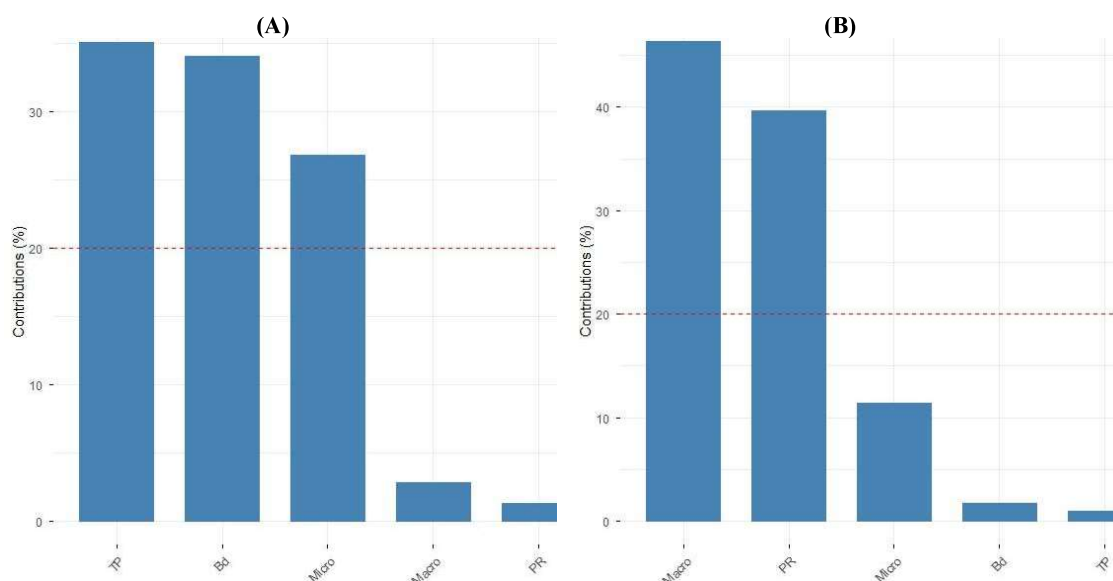


Figura 6. Contribuição das variáveis para a primeira dimensão (A) e a segunda (B) avaliadas em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde). Ds: Densidade do solo (kg dm^{-3}); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro: microporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração na capacidade de campo (MPa).

A razão entre autovalores constatou ausência de multicolinearidade entre os atributos, não comprometendo a análise dos efeitos diretos e indiretos e das correlações no diagrama causal da regressão múltipla. A densidade do solo relativa (Dsrel) foi influenciada pela Macro ($r=-0,88$; $p < 0,01$) e RP ($r=0,50$; $p < 0,05$), sendo os demais atributos sem efeitos pela correlação (Tabela 2). Nos dois casos, cerca de 50% dos efeitos foram diretos (53,3 e 45,1%).

Tabela 2. Efeitos diretos e indiretos e correlação de diagrama causal da regressão múltipla de determinação da densidade do solo relativa (Dsrel) em função dos atributos físicos do solo, em 199 fazendas tropicais de produção de cultivos anuais no Brasil e Paraguai.

Dsrel	Direto		Indireto		Correlação	R ²
	Efeito	%	Indireto	%		
Ds	0,8456	63,7	-0,4824	36,3	0,36 ^{ns}	
PT	0,3054	33,2	-0,6145	66,8	-0,31 ^{ns}	
Micro	0,4606	68,6	-0,2110	31,4	0,25 ^{ns}	0,85
Macro	-0,4674	53,3	-0,4090	46,7	-0,88**	
RP	0,2260	45,1	0,2748	54,9	0,50*	

Ds: Densidade do solo (kg dm^{-3}); PT: porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Micro: microporosidade ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); Macro: macroporosidade do solo ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração na capacidade de campo (MPa).

A Figura 7 apresenta a correlação não significativa entre a Dsrel e a RP campo ($r=0,08^{\text{ns}}$). Em função da ausência de associação, não foram realizadas comparações entre modelos ou entre projetos (Tabela 3). Chama a atenção a ocorrência de valores extremos de RP medida em campo atingindo até 18 MPa, enquanto a RP obtida em laboratório apresentou intervalo mais restrito, variando entre 0,75 e 3,49 MPa (Tabela 1).

Os dados apresentaram elevada dispersão, resultando em baixa concordância entre as variáveis e com 64% de correspondência entre os diagnósticos (campo x laboratório; Figura 7). Considerando o valor de 2,0 MPa como referência de um solo compactado, observou-se predominância de valores de RP campo acima do limite superior do intervalo de confiança, inclusive em áreas classificadas como não compactadas com base na Dsrel.

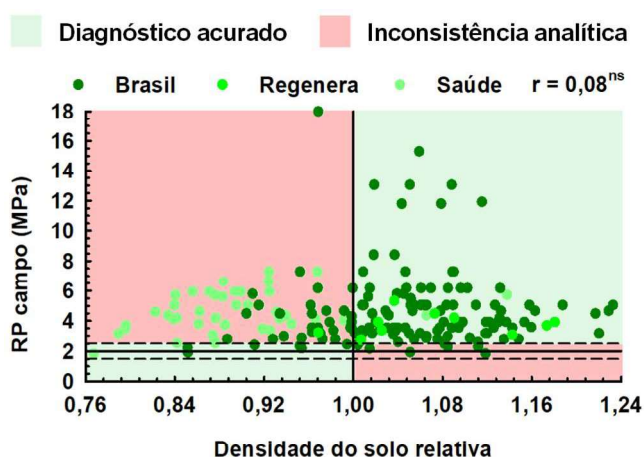


Figura 7. Correlação entre a densidade do solo relativa e a resistência à penetração obtida em campo, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde). Diagnóstico acurado: quando a RP em laboratório é confirmada pela da Dsrel limitante ($> 1,00$); Inconsistência analítica: a RP em laboratório contradiz a Dsrel. A linha cheia representa dos valores de referência das variáveis avaliadas e, a linha pontilhada, o intervalo de confiança segundo Rezende et al. (2025).

Para RP obtida em laboratório, as regressões lineares comparadas por Snedecor & Cochran (1989), bem como seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação, níveis de significância e comparações entre modelos, são apresentadas na Tabela 3. Em contraste com os levantamentos realizados em campo, os ajustes foram significativos para todos os projetos avaliados, indicando aumento da RP com o incremento da Dsrel. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,46 e 0,68 ($p < 0,01$).

As comparações entre os modelos indicaram homogeneidade entre as regressões dos projetos BR/PY e Regenera, permitindo agrupá-las. Em contraste, a regressão ajustada para o projeto Saúde diferiu da regressão agrupada BR/PY-Regenera, com diferença significativa no coeficiente angular, indicando comportamento distinto da relação RP e Dsrel (Tabela 3).

Tabela 3. Regressões lineares ($y = a + bX$) e comparação entre as regressões de ajuste da resistência do solo à penetração obtida em laboratório (RP, MPa) em função da densidade do solo relativa (Dsrel), em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos brasileiros (Brasil), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde) e de acordo com Snedecor e Cochran (1989)⁽¹⁾.

Projeto	Regressão			Comparação			Decisão estatística
	Coefficiente linear, a	Coefficiente angular, b	R^2	F	Coefficiente linear, a	Coefficiente angular, b	
BR/PY	--	--	ns	--	--	--	Não ajustar
Regenera	--	--	ns	--	--	--	Não ajustar
Saúde	--	--	ns	--	--	--	Não ajustar
BR/PY	-2,7	4,5	0,46**	--	--	--	--
Regenera	-3,8	5,6	0,68**	--	--	--	--
BR/PY x Regenera	--	--	--	H	Ns	ns	Agrupar
BR/PY, Regenera	-2,8	4,6	0,48**	--	--	--	--
Saúde	-2,6	5,3	0,61**	--	--	--	--
BR/PY, Regenera x Saúde	--	--	--	H	Ns	**	Não agrupar

⁽¹⁾ H: Homogêneo; ns: não-significativo; *: significativo a 5%; **: significativo a 1%.

A relação entre a Dsrel e a RP apresentou comportamentos distintos quando consideradas as medições realizadas em campo e em laboratório (Figuras 7 e 8), com correlação positiva moderada com a Dsrel ($r=0,50$; $p < 0,05$) e RP mensurada em laboratório. Ainda assim, e classificando qualitativamente o diagnóstico laboratorial com base no valor absoluto de referência, isto é, 2,0 MPa e sem a aplicação do intervalo de confiança (IC), observou-se 85% de concordância entre RP e Dsrel. Com a incorporação do IC, a concordância aumentou para 96%, conforme ilustrado na Figura 8. As

regiões do gráfico correspondentes ao diagnóstico acurado concentraram a maior parte das observações, independentemente do projeto de origem (BR/PY, Regenera e Saúde), enquanto as regiões classificadas como inconsistentes representaram fração reduzida do conjunto amostral.

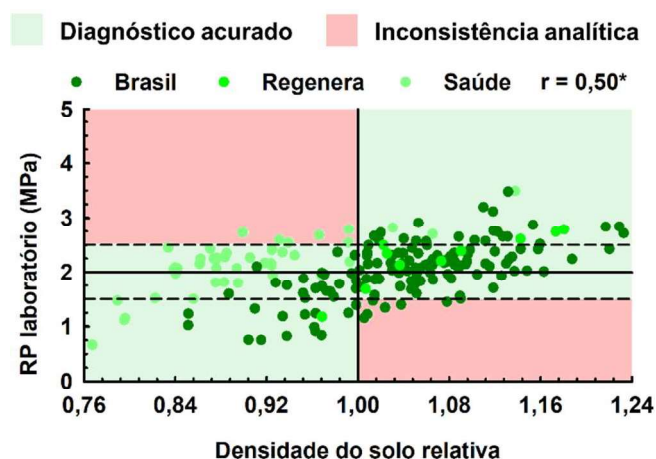


Figura 8. Correlação entre a densidade do solo relativa e a resistência à penetração obtida em laboratório, em fazendas tropicais de produção de cultivos anuais e nos projetos sobre solos sul-americanos (BR/PY), de agricultura regenerativa (Regenera) e sobre a saúde de solos do sudoeste do estado de Goiás (Saúde). Diagnóstico acurado: quando a RP em laboratório é confirmada pela da Dsrel limitante ($> 1,00$); Inconsistência analítica: a RP em laboratório contradiz a Dsrel. A linha cheia representa dos valores de referência das variáveis avaliadas e, a linha pontilhada, o intervalo de confiança segundo Rezende et al. (2025).

4. DISCUSSÃO

4.1 Camadas de impedimento mecânico no solo

Os resultados evidenciam elevada frequência de valores de resistência à penetração obtidos em campo (RPcampo) considerados restritivos, com 98% das áreas apresentando RP superiores à 2,0 MPa (Figura 2), limite amplamente reconhecido como indicativo de restrição física e potencial compactação do solo (Taylor et al., 1966; Dexter et al., 2007; Souza et al., 2021; Sun et al., 2026). Essa recorrência sugere que condições mecanicamente restritivas não representam situações excepcionais, mas um estado estrutural amplamente disseminado nos sistemas agrícolas tropicais, possivelmente decorrente da elevada trafegabilidade e da alta suscetibilidade desses solos à compactação.

Corroboram com Rezende et al. (2025) que, ao avaliarem o comportamento compressivo de solos do Cerrado brasileiro e representativos de ambientes altamente intemperizados, afirmaram tratar-se dos solos mais suscetíveis à compactação no mundo, tornando esse processo praticamente inevitável. Achados semelhantes foram reportados

por Delmond et al. (2024), que observaram valores de RP superiores a 2,0 MPa em aproximadamente 80% dos pontos avaliados em uma área cultivada de cana-de-açúcar no Cerrado brasileiro, fortemente associados às faixas de tráfego de máquinas agrícolas em um solo muito suscetível à degradação física. Ainda assim, é importante ressaltar que, durante as campanhas de penetrometria e amostragem de solo, praticamente não houve relatos, por parte dos agricultores, de perdas na performance agrônômica das culturas associadas à compactação do solo.

Do ponto de vista funcional, a qualidade física do solo para fins agrícolas está associada à sua capacidade em fornecer adequado suporte mecânico às plantas sem restringir a elongação e o metabolismo radicular (Meurer et al., 2020); em contrapartida, incrementos na resistência mecânica impõem restrições ao desenvolvimento vegetal, especialmente nos estágios iniciais de crescimento. Sun et al. (2026), por exemplo, observaram reduções superiores a 50% nos atributos radiculares elongação, comprimento e diâmetro radicular de canola (*Brassica napus* L.) em resposta ao aumento da resistência mecânica do solo. Esses efeitos ocorreram antes mesmo da manifestação de estresses hídricos ou nutricionais, evidenciando que o impedimento mecânico atua como fator limitante primário à absorção de água e nutrientes (Heinen et al., 2025).

À luz desse indicador ecológico, os resultados sugerem risco potencial aos sistemas agropecuários avaliados. Entretanto, os maiores valores de RP_{campo} concentraram-se predominantemente em camadas rasas e imediatamente abaixo da superfície (Figura 3). Sugerimos, portanto, que a compactação em sistemas agrícolas conservacionistas tropicais esteja majoritariamente associada às primeiras camadas do perfil do solo. Nossos resultados corroboram Ferreira et al. (2023), que, ao avaliarem um solo brasileiro sob sistema plantio direto de longa duração, constataram incremento da resistência à penetração imediatamente abaixo da superfície (0,10 m), com ocorrência de valores restritivos até 0,30 m de profundidade.

Reiterando os padrões observados neste estudo, ten Damme et al. (2021) demonstraram que os efeitos do tráfego de máquinas concentram-se principalmente entre 0,10 e 0,30 m de profundidade, coincidentes com as camadas rasas aqui avaliadas. Segundo esses autores, à medida que aumenta a frequência de tráfego, a compactação excedente desloca-se progressivamente para camadas mais superficiais. Resultados semelhantes foram reportados por Kasirajan et al. (2024), que, ao estudarem a dinâmica da resistência à penetração em solo cultivado com arroz sob plantio direto na Índia,

observaram aumento gradual da RP em camadas rasas, com maiores impedimentos a 0,15 m de profundidade.

Os resultados de Heinen et al. (2025) também reforçam a interpretação funcional dos nossos achados ao demonstrarem que camadas com maior resistência mecânica tendem a superficializar o sistema radicular e aumentar o diâmetro das raízes ($> 0,2$ mm), em detrimento da formação de raízes finas ($\leq 0,2$ mm), caracterizando resposta adaptativa típica ao impedimento mecânico do solo.

Em complemento, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a compactação também pode estar associada a camadas subsuperficiais, ainda que em menor frequência. Esse fenômeno foi observado em parte das áreas avaliadas e encontra respaldo em Schjønning et al. (2022), que relataram aumento do impedimento mecânico até 0,70 m de profundidade após única passagem de rodas carregadas de maquinário agrícola em solo franco-arenoso, com efeitos laterais propagando-se além da trilha de rodagem.

Alertamos, portanto, para a possibilidade, embora remota, de ocorrência de degradação física em camadas profundas do solo nas quais as práticas conservacionistas exercem ação limitada (Silva et al., 2019; Ferreira et al., 2026). Chama atenção, nos resultados supracitados, a ocorrência mais frequente de impedimento mecânico em subsuperfície em solos indiscriminados (Figura 4B), geralmente pertencentes a lavouras localizadas fora do bioma Cerrado e, notadamente, em áreas sob Mata Atlântica (nos estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo, Brasil), Amazônia (Roraima), Pantanal (Mato Grosso do Sul) e Caatinga (Maranhão). Esse comportamento pode estar relacionado à maior variabilidade pedológica dessas regiões e ao maior teor de caulinita em comparação aos Latossolos oxidícos típicos do Cerrado [embora a caulinita seja um mineral indicativo de elevado grau de intemperismo, os Latossolos do Cerrado são predominantemente oxidícos e, portanto, ainda mais intemperizados, conforme discutido por Rezende et al. (2025)].

Entre os solos avaliados e previamente classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (este é o sistema taxonômico mais desenvolvido e especializado para a classificação de solos em ambientes tropicais em todo o mundo), destacam-se Argissolos em São Paulo e Roraima, Nitossolos em São Paulo e Paraná e Gleissolos em Roraima. Esses solos podem apresentar gradiente textural e adensamento natural de horizontes subsuperficiais decorrentes de processos pedogenéticos, não caracterizando

necessariamente compactação antrópica, embora tais condições também sejam igualmente detectadas pelo ensaio de penetrometria.

Em contrapartida, as áreas predominantemente recobertas por Latossolos e Neossolos Quartzarênicos nas demais campanhas conduzidas no Brasil e no Paraguai provavelmente refletem efeitos essencialmente antrópicos do manejo agrícola. Nesses solos, o elevado grau de intemperismo promove uniformidade morfológica, elevada friabilidade e alta porosidade ao longo do perfil (Severiano et al., 2013; Rezende et al., 2025). Ainda assim, e em função da natureza deste estudo, não foi possível classificar taxonomicamente todos os solos avaliados. Considerando apenas os aspectos morfológicos da massa terrosa, os solos com morfologia típica de Latossolos apresentaram mais de 95% dos registros de maior impedimento mecânico em camadas superficiais e rasas (Figura 3A), enquanto os solos de morfologia indiscriminada apresentaram aproximadamente 40% dos registros concentrados em camadas profundas-moderadas (Figura 3C).

Em muitos sistemas agrícolas tropicais, entretanto, o enfrentamento da compactação do solo tem sido realizado por meio de intervenções mecânicas indiscriminadas e, possivelmente, desnecessárias, uma vez que a ocorrência da compactação se mostrou predominantemente associada às camadas rasas. Em áreas sob sistema plantio direto consolidado há mais de 20 anos, práticas como preparo ocasional ou subsolagem profunda são frequentemente realizadas sem a identificação prévia da profundidade efetivamente compactada. Nessas condições, a mobilização mecânica promove desestruturação de camadas mais profundas que, até então, encontravam-se preservadas ou funcionalmente adequadas.

Esse processo pode comprometer o arranjo poroso do solo, aumentar a suscetibilidade à recompactação e, opostamente, favorecer o incremento relativo da resistência mecânica em subsuperfície decorrente da recente mobilização superficial (pela redução da RP nas camadas superficiais a valores inferiores aos das camadas profundas), resultando em um falso diagnóstico de compactação subsuperficial.

A correta diagnose da camada de maior impedimento mecânico constitui, portanto, o ponto de partida para tomadas de decisão baseadas em conhecimento científico. Ali et al. (2025) ressaltaram que a eficácia da subsolagem depende diretamente das características do solo, da profundidade efetiva da camada compactada e do tempo de resposta à intervenção. Em concordância, Peixoto et al. (2020), em meta-análise global sobre preparo ocasional em sistemas sob plantio direto, demonstraram que os efeitos

residuais da subsolagem são de curta duração (12 a 24 meses). Além disso, a operação torna o solo mais suscetível à recompactação e pode desencadear efeitos colaterais sobre a capilaridade, reduzindo a disponibilidade hídrica às plantas e acelerando a oxidação da matéria orgânica.

Adicionalmente, a subsolagem nem sempre resulta em incremento de produtividade, tendo ainda seus reconhecidos impactos sobre a perda da fertilidade sistêmica do solo e sobre a emissão de gases de efeito estufa (Nunes et al., 2019; Peixoto et al., 2020). Sob o ponto de vista operacional, a exigência energética aumenta substancial e desnecessariamente com a profundidade de trabalho (Elaoud et al., 2025; Calleja-Huerta et al., 2026). Askari et al. (2022) destacam que a subsolagem está entre as operações agrícolas de maior consumo de combustível e potência do maquinário, sendo frequentemente adotada com base apenas em critérios operacionais, sem considerar a real necessidade física da intervenção.

À luz dos resultados obtidos neste estudo, a ausência de diagnose precisa da compactação do solo pode resultar em aumento dos custos de produção, baixa eficiência operacional e desestruturação desnecessária do perfil do solo (Angelucci et al., 2025), sem os benefícios agronômicos efetivamente esperados. Isso porque a compactação pode não representar um fator limitante, sendo necessária, inicialmente, sua confirmação por meio de diagnose laboratorial, ou estar restrita a camadas rasas imediatamente abaixo da superfície. Ainda assim, e pela vivência de campo durante as campanhas de amostragem, é possível afirmar que a agricultura conservacionista tropical no Brasil encontra-se sob ameaça de uma verdadeira “epidemia da subsolagem”.

Os nossos resultados obtidos com o penetrômetro de campo subsidiaram a amostragem de solo em profundidades majoritariamente compatíveis com as três primeiras camadas do perfil, em consonância com os estudos supracitados acerca do impacto do manejo em sistemas conservacionistas de produção agropecuária. Essas camadas desempenham papel central na regulação das relações solo-água-planta-atmosfera e, adicionalmente, concentraram os maiores impedimentos mecânicos observados neste estudo. Assim, tornam-se barreiras físicas ao adequado desempenho das funções edáficas governadas pela estrutura do solo e ao potencial agronômico dos sistemas produtivos, motivo pelo qual as avaliações laboratoriais concentraram-se nessa faixa do perfil.

4.2. Atributos físicos do solo em laboratório

A elevada variabilidade observada nos atributos físicos do solo não constitui um engodo amostral, mas reflete diretamente a heterogeneidade intrínseca dos pedoambientes avaliados, que abrangem diferentes classes pedológicas, materiais de origem, condições edafoclimáticas e históricos de uso da terra. Esse comportamento é característico de solos agrícolas tropicais e tem sido amplamente reportado na literatura (Severiano et al., 2013; Souza et al., 2021; Rezende et al., 2025). No presente estudo, manifestou-se de forma consistente na amplitude granulométrica, na organização do sistema poroso e na resposta mecânica do solo, configurando condição representativa essencial para a interpretação da diagnose da compactação.

A ampla variação observada nas frações texturais, com teores de areia entre 4 e 912 g kg⁻¹ e de argila entre 66 e 901 g kg⁻¹, associada a coeficientes de variação superiores a 50% (Tabela 1), evidencia que o conjunto amostral engloba solos com comportamentos físicos contrastantes. Esses resultados são coerentes com levantamentos em larga escala conduzidos em ambientes tropicais por Souza et al. (2021) e Schjøning et al. (2023), e agrega robustez ao estudo ao capturar condições reais de produção agrícola. Mesmo em solos altamente intemperizados, as respostas físicas diferem substancialmente em função da interação entre características intrínsecas e históricos de manejo (Severiano et al., 2011; Severiano et al., 2013; Lima et al., 2025), reforçando a elevada heterogeneidade estrutural dos solos nos agroambientes tropicais.

A estabilidade da densidade de partículas ($D_p = 2,65 \pm 0,10 \text{ kg dm}^{-3}$; CV = 4%; Tabela 1) confirma que a variabilidade observada nos atributos físicos está predominantemente associada ao uso e manejo do solo, e não à gênese ou a diferenças mineralógicas expressivas. Esse resultado é particularmente relevante, pois indica que as variações observadas em densidade do solo, porosidade e resistência à penetração são controladas principalmente pelo arranjo das partículas unitárias e pelas práticas de manejo, em consonância com as investigações de Souza et al. (2021), Kumi et al. (2023) e Rezende et al. (2025). Assim, o sistema poroso emerge como principal regulador da funcionalidade física do solo, especialmente em ambientes agrícolas intensificados.

A análise de componentes principais (PCA) forneceu uma visão integrada desses processos, evidenciando padrões estruturais bem definidos e coerentes aos resultados da estatística descritiva. As duas primeiras dimensões, ao explicar 87% da variância total, indica que os atributos físicos avaliados capturam de forma robusta a variabilidade estrutural dos solos avaliados (Figura 5). O antagonismo entre densidade do solo (D_s) e

porosidade total (PT), expresso ao longo da Dim 1, caracteriza um gradiente estrutural clássico amplamente documentado na literatura, no qual o aumento da densidade implica redução do volume de vazios (Tormena et al., 2002; Silva et al., 2021; Suzuki et al., 2022; Lima et al., 2025). Essa relação está diretamente associada à formação de camadas compactadas e à reorganização do sistema poroso, com implicações diretas para a aeração, a dinâmica hídrica e o crescimento radicular (Schjønning et al., 2022; Schjønning, 2023).

A diferenciação observada entre as classes texturais no plano da PCA (Figura 5) reforça o papel da textura como regulador primário do comportamento físico-hídrico dos solos tropicais. Nos arenosos e de textura média (até 350 g kg⁻¹ de argila), predominantes no Projeto BR/PY, associaram-se a maiores valores de densidade do solo, enquanto solos argilosos e muito argilosos, característicos dos Projetos Saúde e Regenera, apresentaram maior microporosidade e maiores valores de resistência à penetração em laboratório (Figura 5B). Esse padrão sugere que solos com elevados teores de argila, mesmo sob densidades relativamente inferiores, podem expressar de forma mais intensa os efeitos da compactação sobre a resistência mecânica, conforme descrito por Yue et al. (2021), Lima et al. (2025) e Rezende et al. (2025).

A Dim 2 da PCA expressou claramente a oposição entre macroporosidade (Macro) e resistência à penetração em laboratório (RPlaboratório), evidenciando que a redução do volume e da conectividade dos poros é diretamente associada ao aumento do impedimento mecânico (Figura 5). Esse comportamento reforça o papel central da macroporosidade como componente funcional do sistema poroso, responsável pela aeração, drenagem e formação de vias preferenciais ao crescimento radicular (Oliveira et al., 2004; Barbosa et al., 2018; Silva et al., 2019; Suzuki et al., 2022).

A presença de macroporos contínuos, incluindo bioporos de origem vegetal (Silva et al., 2019) ou decorrentes da atividade da fauna edáfica, pode criar rotas preferenciais ao crescimento radicular e mitigar os efeitos deletérios da matriz sólida coesa, mesmo em solos com elevados valores de RP quando avaliados instrumentalmente (o penetrômetro possui haste rígida, enquanto as raízes apresentam menor diâmetro, elevada flexibilidade e capacidade de exsudação de mucilagens que atuam na lubrificação dos poros). Novamente, ressalta-se o risco do preparo ocasional na destruição da bioporosidade do solo.

As correlações negativas observadas entre PT e Ds (Figura 5), bem como entre Macro e RPlaboratório, reforçam a interdependência entre os atributos estruturais do solo.

Esses resultados indicam que a resistência à penetração não deve ser interpretada como atributo isolado, mas como resposta mecânica emergente da interação entre os atributos associados ao arrançamento das partículas e à organização do sistema poroso (Wang & Zhang, 2024; Rezende et al., 2025). Essa dependência ajuda a explicar a ampla faixa de valores críticos reportados na literatura e a dificuldade em estabelecer limiares universais aplicáveis a ambientes com elevada variabilidade estrutural.

Um avanço importante na compreensão dessas inter-relações foi apresentado por Rezende et al. (2025) por meio de funções de pedotransferência voltadas à estimativa da densidade do solo limitante ao crescimento vegetal e à determinação da densidade do solo relativa (Dsrel; Equação 2). Segundo Håkansson (1990), posteriormente reiterado por Reichert et al. (2009), a Dsrel constitui o atributo mais adequado para avaliação das alterações estruturais decorrentes do uso e manejo do solo, por integrar diferentes modificações estruturais em um único indicador.

O fato de apenas a macroporosidade e a RPlaboratório terem apresentado correlação com a Dsrel na análise de trilha (Tabela 2) evidencia que esses atributos são os mais sensíveis às alterações estruturais em solos agropecuários tropicais, conforme também discutido por Severiano et al. (2011) e Rezende et al. (2025). Em conjunto, os resultados evidenciam o estado físico do solo e, na avaliação da compactação, privilegiam abordagens integradas capazes de capturar o arrajamento e sua resposta ao uso e manejo, em consonância com os padrões observados neste estudo.

4.3. Penetrometria de campo e laboratório na diagnose da compactação do solo

Se, por um lado, a macroporosidade do solo foi o atributo que apresentou maior sensibilidade às alterações estruturais, conforme evidenciado pela análise em trilha (Tabela 2), a resistência à penetração apresenta ampla aceitação entre técnicos extensionistas e agricultores (Benevenuto et al., 2020; Dörner et al., 2022; Kumi et al., 2023; Vanderhasselt et al., 2023; Jug et al., 2025), sobretudo em função de sua exequibilidade operacional, capacidade de fornecer resultados instantâneos em larga escala e relativa acessibilidade instrumental, especialmente por meio de equipamentos portáteis de campo.

Contudo, a interpretação da RP requer definição criteriosa de valores de referência representativos da condição estrutural do solo e, adicionalmente, consideração explícita da forte dependência do conteúdo de água no momento da avaliação. Nesse sentido,

recomenda-se que as determinações sejam realizadas sob condições próximas à capacidade de campo (Hakansson, 1990; Tormena et al., 2002; Dexter et al., 2007; Severiano et al., 2011; Moraes et al., 2014; Barbosa et al., 2018; Benevenuto et al., 2020; Ferreira et al., 2023; Kumi et al., 2023; Delmond et al., 2024; Moraes et al., 2024; Suzuki et al., 2024; Ali et al., 2025; Rezende et al., 2025; Ferreira et al., 2026). Tais condições somente foram asseguradas em laboratório por meio do controle do potencial mátrico, o que possivelmente explica a ausência de ajuste matemático consistente para as regressões envolvendo a RP_{campo} (Tabela 3).

Ao considerar a dimensão espacial da agricultura tropical e a necessidade de diagnósticos operacionais em larga escala, torna-se praticamente inviável padronizar o estado energético da água no solo no momento das avaliações de campo, dada a natureza altamente dinâmica e efêmera da água no solo. Especialmente em campos de produção, não é possível assegurar se os valores absolutos de RP obtidos refletem efetivamente ausência ou ocorrência de compactação do solo. Essa limitação torna-se ainda mais evidente diante da ampla variação de limiares críticos reportados na literatura [inferiores a 2,0 MPa em solos tropicais segundo Taylor et al. (1966) e Meurer et al. (2020), ou a 2,5 MPa segundo Severiano et al. (2011) e Rezende et al., 2025; inferiores a 3,5 MPa em áreas sob plantio direto de longa duração conforme Moraes et al. (2014) e Bonetti et al. (2025); ou mesmo inferiores a 6,0 MPa segundo Lima et al. (2025)].

Assim, os resultados obtidos em campo sob condições de friabilidade, isto é, em condições de solo úmido, porém sem a certificação quanto à capacidade de campo, não são conclusivos. Nessas condições, não é possível assegurar alterações estruturais exclusivamente com base na RP_{campo} , podendo alguns altos valores de RP_{campo} encontrados não associados à condição de solo compactado (Figura 7).

Contudo, é oportuno considerar, como condição de contorno, que o conteúdo de água esteja relativamente uniforme ao longo do perfil do solo. Caso contrário, pode ocorrer incremento da resistência mecânica em profundidade decorrente exclusivamente de gradientes de umidade no perfil (situação identificada em algumas áreas avaliadas), fazendo com que camadas mais profundas apresentem maior impedimento quando, na realidade, encontram-se apenas mais secas que as camadas superficiais em razão da frente de umedecimento. Aplica-se também, o comportamento contrário para frentes de secagem do solo.

Considerando a ampla representatividade de solos e sistemas de manejo contemplados nesta pesquisa, a RP em campo assume caráter anamnésico ao expressar a

magnitude da resistência mecânica sem, contudo, elucidar suas causas; caso interpretada isoladamente, pode novamente resultar em falsos diagnósticos. Ainda assim, essa estratégia permite identificar camadas de maior impedimento mecânico e/ou maior interesse investigativo, em consonância com a recomendação de Stolf et al. (1983) quanto ao uso do penetrômetro na detecção de camadas restritivas inicialmente independentes do conteúdo de água no solo.

Além disso, a RPcampo permite refinar a amostragem para fins de diagnose laboratorial da estrutura do solo, diferentemente das avaliações baseadas em profundidades previamente estabelecidas (em estudos de Física do Solo, sugerimos que a profundidade investigada constitua resultado da diagnose e não apenas definição metodológica, como frequentemente observado na literatura).

Espera-se que as limitações metodológicas inerentes às avaliações *in situ* sejam superadas por análises complementares conduzidas em laboratório, cujas condições analíticas controladas asseguram maior confiabilidade diagnóstica. Nesse contexto, a RPLaboratório pôde ser estimada a partir da Dsrel por meio de regressões com coeficientes de determinação variando entre 0,46 e 0,68 ($p < 0,01$; Tabela 3). Esses resultados indicam que parcela substancial da variação da resistência mecânica é explicada diretamente pelo estado de compactação do solo e corroborando a sua ocorrência em sistemas agrícolas tropicais.

A ausência de diferenças entre as regressões ajustadas para os projetos BR/PY e Regenera (Tabela 3) confirma que, sob condições experimentais controladas, a resistência mecânica do solo incrementa proporcionalmente à Dsrel, sendo ambas governadas pela maior ocorrência de degradação estrutural ou de solos naturalmente adensados observados nestes projetos. O agrupamento das regressões reflete um controle estrutural comum associado à reorganização do espaço poroso e à redução da macroporosidade, conforme descrito por Reichert et al. (2009) e corroborado pelos padrões multivariados observados na PCA (Figura 5A).

Em contraste, a regressão ajustada para o Projeto Saúde diferiu da regressão agrupada BR/PY-Regenera, particularmente quanto ao coeficiente angular (Tabela 3), indicando que, embora a resposta da RP seja proporcional ao incremento da Dsrel, as alterações estruturais varia entre os projetos. Esses resultados demonstram que, mesmo quando a Dsrel é utilizada para normalizar os efeitos da textura e da composição do solo, diferenças relacionadas ao manejo, aqui representadas pelos distintos projetos, podem

promover alterações na coesão da matriz e na organização estrutural do solo, resultando em diferentes magnitudes de resistência mecânica.

Tal comportamento reforça que as mensurações de RP não são universais, mas dependentes de fatores pedológicos e agronômicos, conforme destacado por Bayat et al. (2019), Kuhwald et al. (2020), Silva et al. (2021) e Suzuki et al. (2024). Ainda assim, para a condição crítica de $D_{srel} = 1$, os valores estimados de RP foram de 1,8 e 2,7 MPa para o agrupamento BR/PY-Regenera e para o Projeto Saúde, respectivamente, cuja média (2,3 MPa) aproxima-se substancialmente do valor de 2,0 MPa amplamente aceito como referência global de qualidade física do solo.

Se, por um lado, a diagnose da compactação baseada exclusivamente na RP_{campo} apresentou elevado risco de inconsistência analítica, evidenciado pela elevada dispersão dos dados ($r = 0,08_{ns}$; Figura 7), pela baixa assertividade qualitativa (36% de inconsistências) e pela ampla variação dos valores observados (1,8-18 MPa), a RP obtida em laboratório, embora tenha apresentado correlação moderada ($r = 0,50$; $p < 0,05$), proporcionou expressivo aumento da assertividade qualitativa, alcançando 85%, e 96% com a incorporação do intervalo de confiança, além de reduzir substancialmente a amplitude dos resultados (0,75-3,49 MPa; Tabela 1 e Figura 8). Esses resultados sugerem que parte das inconsistências observadas esteja associada a limitações metodológicas, sobretudo à ausência de controle da umidade do solo durante os testes de campo, e não necessariamente a incompatibilidades conceituais entre os indicadores (Vaz et al., 2022; Suzuki et al., 2024; Lima et al., 2025).

Ante o exposto, a diagnose da compactação realizada em campo, voltada à identificação da camada de maior impedimento mecânico e associada às avaliações laboratoriais para definição de valores limitantes, evidenciou risco iminente de compactação em sistemas agropecuários tropicais. Aproximadamente 75% das lavouras apresentaram condições compatíveis com compactação do solo ($R_{Laboratório} > 2,0$ MPa e $D_{srel} > 1,00$), predominantemente em camadas rasas imediatamente abaixo da superfície, conforme indicado pela RP_{campo}. Embora superficiais, essas camadas podem limitar severamente os sistemas produtivos quando negligenciadas.

Nesse contexto, Ferreira et al. (2026) apresentaram alternativa promissora para mitigação da compactação em sistemas plantio direto. Os autores observaram que o uso de hastes sulcadoras a 0,15 m de profundidade em semeadoras de grãos reduziu a densidade do solo em 20% e a RP em até 50% em comparação aos discos duplos, promovendo melhor arquitetura radicular e maior capacidade de exploração do perfil do

solo, aspecto potencialmente decisivo em anos secos. Assim, o uso desse implemento constitui alternativa prática e menos disruptiva à subsolagem para mitigação da compactação superficial, mantendo a premissa do sistema plantio direto de restringir a mobilização do solo ao sulco de semeadura. Dessa forma, a escolha do mecanismo de abertura do sulco pode integrar estratégias de manejo mais assertivas para mitigação da compactação em camadas rasas.

Por fim, faz-se necessário refinar os valores de referência utilizados na diagnose da resistência à penetração, particularmente o limiar de $2,0 \pm 0,5$ MPa, possivelmente insuficiente como critério absoluto. A arquitetura radicular e outras estratégias fisiológicas podem tolerar ou contornar impedimentos mecânicos pela exploração de bioporos, fissuras e interfaces estruturais não capturadas pela trajetória rígida imposta pelo penetrômetro (Bengough & Mullins, 1990; Gao et al., 2016; Lima et al., 2025).

Ressalta-se, ainda, que determinadas espécies e/ou manejos são sensíveis mesmo a valores inferiores aos tradicionalmente considerados críticos (Silva et al., 2021; Lima et al., 2025). Portanto, valores elevados de RP não implicam necessariamente restrição proporcional ao crescimento radicular, especialmente em solos com rede bioporosa bem desenvolvida, como frequentemente observado em sistemas conservacionistas de produção agropecuária.

Dessa forma, a resistência à penetração deve ser compreendida como indicador funcional complementar, cuja interpretação exige contextualização pedológica, controle metodológico e integração com atributos estruturais do solo, conforme amplamente defendido na literatura (Håkansson, 1990; Reichert et al., 2009; Vaz et al., 2022; Suzuki et al., 2024).

5. CONCLUSÃO

A variabilidade dos atributos físicos mostrou-se intrínseca aos pedoambientes, sendo condicionada pela textura, pela organização do sistema poroso e pelo histórico de manejo. Dentre os atributos avaliados, a macroporosidade destacou-se pela maior sensibilidade às alterações estruturais do solo, enquanto a robustez diagnóstica da resistência à penetração mostrou-se dependente do método de avaliação empregado. Sob condições laboratoriais, esse indicador apresentou elevada assertividade. Em contrapartida, avaliações realizadas em campo exibiram elevada inconsistência analítica

e tendência à superestimação dos impedimentos mecânicos, possivelmente em razão a impossibilidade de controle do conteúdo de água no solo por ocasião da avaliação.

Dessa forma, a diagnose da compactação em ambientes tropicais requer abordagem integrada, associando anamnese de campo e avaliações laboratoriais. Nesse sentido, a resistência à penetração *in situ* deve ser interpretada como um indicador funcional complementar, reduzindo o risco de falsos diagnósticos acerca da condição estrutural do solo.

Pelos critérios avaliados, a compactação do solo constitui uma condição estrutural amplamente disseminada em sistemas agrícolas tropicais, associada à intensificação do uso do solo e ao tráfego mecanizado, inclusive em sistemas conservacionistas. Embora concentrados predominantemente em camadas rasas imediatamente abaixo da superfície (0,10–0,30 m), podem comprometer significativamente o desenvolvimento das culturas e a sustentabilidade dos sistemas produtivos quando negligenciados.

6. REFERÊNCIAS

- Ali, M., Qaswar, M., Borundia, A., & Mouazen, A. M. (2025). Short-term effects of vertical hole drilling using a novel semi-autonomous machine on maize yield and soil physical properties in a Cambisol sandy soil. *Soil and Tillage Research*, 253, 106695. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106695>
- Angelucci, L., Varani, M., Pinet, F., Martin, V., Vertua, A., Molari, G., & Mattetti, M. (2025). The role of tyres and soil conditions in enhancing the efficiency of agricultural tractors. *Soil and Tillage Research*, 251, 106570. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106570>
- Askari, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., Hegazy, R., & Okasha, M. (2022). Prediction and optimizing the multiple responses of the overall energy efficiency (OEE) of a tractor-implement system using response surface methodology. *Journal of Terramechanics*, 103, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.06.003>
- Barbosa, L. C., Souza, Z. M. de, Franco, H. C. J., Otto, R., Rossi Neto, J., Garside, A. L., & Carvalho, J. L. N. (2018). Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, 13, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>
- Bayat, H., Kolahchi, Z., Valaey, S., Rastgou, M., & Mahdavi, S. (2019). Iron and magnesium nano-oxide effects on some physical and mechanical properties of a loamy Hypocalcic Cambisol. *Geoderma*, 335, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.007>
- Benevenuto, P. A. N., Morais, E. G. de, Souza, A. A., Vasques, I. C. F., Cardoso, D. P., Sales, F. R., Severiano, E. C., Homem, B. G. C., Casagrande, D. R., & Silva, B. M.

- (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, 117, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>
- Bengough, A. G., & Mullins, C. E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, 41(3), 341-358. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x>
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Ben Hassen, H., Elaoud, A., & Masmoudi, K. (2020). Modeling of agricultural soil compaction using discrete Bayesian networks. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(5), 2571-2582. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02664-6>
- Bonetti, J. de A., Franco, H. H. S., Guimarães, R. M. L., & Tormena, C. A. (2025). Short-term effects of Urochloa intercropped with corn on the structure properties of a soil under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 49. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240036>
- Calleja-Huerta, A., Munkholm, L. J., & Lamandé, M. (2026). A new model framework for infield spatialization of traffic induced soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 255, 106775. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106775>
- da Silva, T. S., Pulido-Moncada, M., Schmidt, M. R., Katuwal, S., Schlüter, S., Köhne, J. M., Mazurana, M., Juhl Munkholm, L., & Levien, R. (2021). Soil pore characteristics and gas transport properties of a no-tillage system in a subtropical climate. *Geoderma*, 401, 115222. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115222>
- de Lima, R. P., Rolim, M. M., Toledo, M. P. S., Tormena, C. A., da Silva, A. R., e Silva, I. A. C., & Pedrosa, E. M. R. (2022). Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 215, 105215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105215>
- Delmond, J. G., Guimarães Junnyor, W. da S., Brito, M. F. de, Rossoni, D. F., Araujo-Junior, C. F., Severiano, E. da C., & Severiano, E. C. (2024). Which operation in mechanized sugarcane harvesting is most responsible for soil compaction? *Geoderma*, 448, 116979. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116979>
- Dexter, A. R., Czyż, E. A., & Gaę, O. P. (2007). A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 93(2), 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.011>
- Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., Horn, R., Uteau, D., Wendroth, O., Lagos, L., & Zúñiga, F. (2022). Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research*, 221, 105396. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105396>

- Elaoud, A., Jalel, R., & Ben Hassen, H. (2025). Bayesian network versus variational Bayesian Linear Regression Model for predicting penetration resistance and compaction factors in agricultural soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230, 109913. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109913>
- Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Severiano, E. da C., Nunes, M. R., Menezes, C. C. E. de, Antille, D. L., & Preto, V. R. de O. (2023). Effectiveness of narrow tyne and double-disc openers to overcome shallow compaction and improve soybean yield in long-term no-tillage soil. *Soil and Tillage Research*, 227, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105622>
- Ferreira, C. J. B., Preto, V. R. de O., Tormena, C. A., Nunes, M. R., Braz, G. B. P., Severiano, E. da C., & de Jauregui, A. S. S. (2026). An alternative to mitigate soil compaction and improve crop yield under no-till systems. *Geoderma Regional*, 44, e01051. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01051>
- Gao, W., Hodgkinson, L., Jin, K., Watts, C. W., Ashton, R. W., Shen, J., Ren, T., Dodd, I. C., Binley, A., Phillips, A. L., Hedden, P., Hawkesford, M. J., & Whalley, W. R. (2016). Deep roots and soil structure. *Plant, Cell & Environment*, 39(8), 1662-1668. <https://doi.org/10.1111/pce.12684>
- Håkansson, I. (1990). A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, 16(1-2), 105-120. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90024-8)
- Heinen, M., Schneider, H. M., Shan, K., Bakker, G., & Bakema, G. (2025). The effect of a compacted subsoil layer on the development of the maize root system. *Soil and Tillage Research*, 254, 106763. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106763>
- Henrique Dias Batista, P., Luiz Pontes de Almeida, G., Pandorfi, H., Paiva de Lima, R., Wanderley Costa de Medeiros, V., Lennon Bezerra da Silva, J., Aparecido Silva de Melo, A., & Sales Coutinho, A. (2024). Assessment spatial soil physical properties under rotational cattle grazing in Northeastern Brazil. *CATENA*, 240, 108002. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108002>
- Hu, W., Lawrence-Smith, E., Tregurtha, C., Meenken, E., & Beare, M. (2025). Enhancing soil penetration resistance measurements and interpretations: Normalising for moisture variability to better assess land use effects. *Geoderma*, 463, 117572. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117572>
- Jabro, J. D., Allen, B. L., Rand, T., Dangi, S. R., & Campbell, J. W. (2021). Effect of Previous Crop Roots on Soil Compaction in 2 Yr Rotations under a No-Tillage System. *Land*, 10(2), 202. <https://doi.org/10.3390/land10020202>
- J. A. Vomocil and W. J. Flocker. (1961). Effect of Soil Compaction on Storage and Movement of Soil Air and Water. *Transactions of the ASAE*, 4(2), 0242-0246. <https://doi.org/10.13031/2013.41066>
- Jug, D., Radočaj, D., Jug, I., Jurišić, M., Brozović, B., Ivelic-Sáez, J., Wilczewski, E., Dörner, J., & Đurđević, B. (2025). Soil penetration resistance prediction based on a comparative evaluation of individual and ensemble machine learning under varying

- tillage, fertilization and liming treatments. *Soil and Tillage Research*, 254, 106720. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106720>
- Kasirajan, S., Parthipan, T., Elamathy, S., Kumar, G. S., Rajavel, M., & Veeramani, P. (2024). Dynamics of soil penetration resistance, moisture depletion pattern and crop productivity determined by mechanized cultivation and lifesaving irrigation in zero till blackgram. *Heliyon*, 10(7), e28625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28625>
- Klonowski, J., Lisowski, A., Dąbrowska, M., Chlebowski, J., Sypuła, M., & Zychowicz, W. (2024). The Usefulness of Soil Penetration Resistance Measurements for Improving the Efficiency of Cultivation Technologies. *Sustainability*, 16(16), 6962. <https://doi.org/10.3390/su16166962>
- Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde*. W. de Gruyter.
- Kuhwald, M., Hamer, W. B., Brunotte, J., & Duttmann, R. (2020). Soil Penetration Resistance after One-Time Inversion Tillage: A Spatio-Temporal Analysis at the Field Scale. *Land*, 9(12), 482. <https://doi.org/10.3390/land9120482>
- Kumi, F., Obour, P. B., Arthur, E., Moore, S. E., Asare, P. A., Asiedu, J., Angnuureng, D. B., Atiah, K., Amoah, K. K., Amponsah, S. K., Dorvlo, S. Y., Banafo, S., & Adu, M. O. (2023). Quantifying root-induced soil strength, measured as soil penetration resistance, from different crop plants and soil types. *Soil and Tillage Research*, 233, 105811. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105811>
- Lima, R. P. de, Tormena, C. A., Moraes, M. T. de, Souza, Z. M. de, Rolim, M. M., & Cherubin, M. R. (2025). Revisiting penetrometer models for estimating root elongation. *Soil and Tillage Research*, 248, 106400. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106400>
- Meurer, K., Barron, J., Chenu, C., Coucheney, E., Fielding, M., Hallett, P., Herrmann, A. M., Keller, T., Koestel, J., Larsbo, M., Lewan, E., Or, D., Parsons, D., Parvin, N., Taylor, A., Vereecken, H., & Jarvis, N. (2020). A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. *Global Change Biology*, 26(10), 5382-5403. <https://doi.org/10.1111/gcb.15289>
- Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaiissi, A., & Horen, H. (2019). Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, 449, 117472. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117472>
- Moraes, M. T. de, Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., & Silva, V. R. da. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38(1), 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Moraes, M. T. de Olbermann, F. J. R., Bonetti, J. de A., Pilegi, L. R., Costa, M. V. R., Pacheco, V., Rogers, C. D., & Guimarães, R. M. L. (2024). The impacts of cover crop mixes on the penetration resistance model of an Oxisol under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 242, 106138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106138>

- Nunes M.R, Pauletto E.A, Denardin J.E, S. Suzuki L.E.A, van Es H.M. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. *Soil Tillage Res.* 2019;186:183-90. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.017>
- Oliveira, P. L. A. M. de. (2002). *Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo: um procedimento para a estimativa pormenorizada do sequestro de carbono pelo solo*. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, (2002), p.6.
- Oliveira, G. C., Dias Junior, M. S., Curi, N., & Resck, D. V. S. (2004). Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 28, 327-336.
- Peixoto, D. S., Silva, L. de C. M. da, Melo, L. B. B. de, Azevedo, R. P., Araújo, B. C. L., Carvalho, T. S. de, Moreira, S. G., Curi, N., & Silva, B. M. (2020). Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 745, 140887. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>
- Rathnayake, N. R. R. W. S., Leelamanie, D. A. L., & Maeda, M. (2025). Shallow-depth hardpan attributes influence soil surface and subsurface hydraulic properties. *CATENA*, 259, 109405. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109405>
- Reichert, J. M., Morales, C. A. S., de Bastos, F., Sampietro, J. A., Cavalli, J. P., de Araújo, E. F., & Srinivasan, R. (2021). Tillage recommendation for commercial forest production: Should tillage be based on soil penetrability, bulk density or more complex, integrative properties? *Geoderma Regional*, 25, e00381. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00381>
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Rezende, A. G., Souza, I. R. M. de, Fonseca, C. M., Delmod, J. G., Silva, E. A., Costa, K. A. de P., & Severiano, E. da C. (2025). Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: Implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions. *Geoderma*, 459, 117395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117395>
- Ribeiro, F. M., Lima, M., Costa, P. A. T. da, Pereira, D. M., Carvalho, T. A., Souza, T. V., Botelho, H. A., Silva, F. F. e, & Costa, A. C. (2019). Associations between morphometric variables and weight and yields carcass in Pirapitinga *Piaractus brachypomus*. *Aquaculture Research*, 50(7), 2004-2011. <https://doi.org/10.1111/are.14099>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Lima, H. N., Marques, F. A., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2025). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (6. ed.). Embrapa Solos.

- Schjønning, P., Munkholm, L. J., & Lamandé, M. (2022). Soil characteristics and root growth in a catena across and outside the wheel tracks for different slurry application systems. *Soil and Tillage Research*, 221, 105422. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105422>
- Schjønning, P. (2023). An empirical model for prediction of topsoil deformation in field traffic. *Soil and Tillage Research*, 227, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105589>
- Schjønning, P., Lamandé, M., De Pue, J., Cornelis, W. M., Labouriau, R., & Keller, T. (2023). *The challenge in estimating soil compressive strength for use in risk assessment of soil compaction in field traffic* (pp. 61-105). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.003>
- Severiano, E. da C., Oliveira, G. C. de, Dias Júnior, M. de S., Costa, K. A. de P., Benites, V. de M., & Ferreira Filho, S. M. (2011). Structural changes in latosols of the cerrado region: II - soil compressive behavior and modeling of additional compaction. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 35(3), 783-791. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300014>
- Severiano, E. da C., César de Oliveira, G., Junior, M. de S. D., Curi, N., Costa, K. A. de P., & Carducci, C. E. (2013). Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, 51(3), 193-202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Silva, W. M. da, Bianchini, A., & Cunha, C. A. da. (2016). Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. *Engenharia Agrícola*, 36(3), 449-459. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p449-459/2016>
- Silva, J. F. G., Gonçalves, W. G., Costa, K. A. de P., Flávio Neto, J., Brito, M. F. de, Silva, F. C. da, & Severiano, E. da C. (2019). Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(6Supl2), 2973. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl2p2973>
- Silva, J. F. G., Linhares, A. J. de S., Gonçalves, W. G., Costa, K. A. de P., Tormena, C. A., Silva, B. M., Oliveira, G. C. de, & Severiano, E. da C. (2021). Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? *Soil and Tillage Research*, 208, 104873. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104873>
- Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1989). *Statistical methods* (8th ed.). Iowa State University.
- Souza, R., Hartzell, S., Freire Ferraz, A. P., de Almeida, A. Q., de Sousa Lima, J. R., Dantas Antonino, A. C., & de Souza, E. S. (2021). Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. *Soil and Tillage Research*, 205, 104768. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104768>
- Souza, C. M. A. de, Suárez, A. H. T., Arcoverde, S. N. S., Armando, E. J., & Maciak, P. A. G. (2022). Least limiting water range in Oxisol under two conservation tillage

- systems in sugarcane farming. *Revista Ceres*, 69(5), 586-593. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202269050012>
- Stolf, R., Fernandes, J., & Furlani Neto, V. L. (1983). Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. *STAB - Açúcar, Alcool & Subprodutos*, 1(3), 18-23.
- Strock, C. F., Rangarajan, H., Black, C. K., Schäfer, E. D., & Lynch, J. P. (2022). Theoretical evidence that root penetration ability interacts with soil compaction regimes to affect nitrate capture. *Annals of Botany*, 129(3), 315-330. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab144>
- Sun, Y., Zhang, Q., Liao, Q., Cai, J., & Yan, H. (2026). Analysis of rapeseed embryo root penetration resistance under different soil compaction levels based on the discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 258, 106953. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106953>
- Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Alves, M. C., & Reichert, J. M. (2022). Medium-Term No-Tillage, Additional Compaction, and Chiseling as Affecting Clayey Subtropical Soil Physical Properties and Yield of Corn, Soybean and Wheat Crops. *Sustainability*, 14(15), 9717. <https://doi.org/10.3390/su14159717>
- Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Pillon, C. N., & Reichert, J. M. (2024). Mechanical Resistance to Penetration for Improved Diagnosis of Soil Compaction at Grazing and Forest Sites. *Forests*, 15(8), 1369. <https://doi.org/10.3390/f15081369>
- Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102(1), 18-22. <https://doi.org/10.1097/00010694-196607000-00002>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed.).
- ten Damme, L., Schjønning, P., J. Munkholm, L., Green, O., K. Nielsen, S., & Lamandé, M. (2021). Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling. *Soil and Tillage Research*, 213, 105128. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105128>
- Tormena, C. A., Barbosa, M. C., Costa, A. C. S. da, & Gonçalves, A. C. A. (2002). Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, 59(4), 795-801. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026>
- Vanderhasselt, A., Cool, S., D'Hose, T., & Cornelis, W. (2023). How tine characteristics of subsoilers affect fuel consumption, penetration resistance and potato yield of a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 228, 105631. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105631>
- Vaz, C. M. P., de Resende, J. M., Franchini, J. C., Debiasi, H., & Nunes, M. R. (2022). Evaluation and recommendations for the use of dynamic penetrometers. *Soil and Tillage Research*, 220, 105373. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105373>

Wang, N., & Zhang, T. (2024). Soil pore structure and its research methods: A review. *Soil and Water Research*, 19(1), 1-24. <https://doi.org/10.17221/64/2023-SWR>

Yue, L., Wang, Y., Wang, L., Yao, S., Cong, C., Ren, L., & Zhang, B. (2021). Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. *Soil and Tillage Research*, 214, 105166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105166>

CONCLUSÃO GERAL

1. A compactação do solo configura-se como uma condição recorrente em agroecossistemas tropicais sob uso intensivo, manifestando-se principalmente nas camadas superficiais do solo;
2. As medições de resistência do solo à penetração em campo são altamente dependentes de condições pontuais, especialmente do teor de água no momento da avaliação;
3. A resistência à penetração obtida em campo tende a superestimar o impedimento mecânico quando utilizada como critério diagnóstico isolado;
4. Em condições laboratoriais controladas, a resistência do solo à penetração apresentou maior coerência diagnóstica e melhor relação com indicadores estruturais estáveis;
5. A densidade relativa do solo mostrou-se um indicador robusto para representar o estado estrutural do solo em ambientes tropicais.
6. A textura do solo, especialmente de frações finas, exerce influência determinante sobre a resistência mecânica, a porosidade e o comportamento compressivo dos solos tropicais;
7. As funções de pedotransferência mostraram-se ferramentas práticas e acessíveis para apoiar a avaliação do comportamento compressivo e da capacidade de suporte do solo, com potencial de aplicação em escala de campo;
8. Modelos simplificados, porém fisicamente fundamentados, mostraram-se mais adequados para representar o comportamento compressivo dos solos tropicais do que abordagens excessivamente complexas;
9. O comportamento compressivo dos solos tropicais é fortemente controlado pela interação entre teor de água e frações finas do solo (argila+silte);
10. A associação entre teor de água e argila + silte capturou de maneira mais eficiente a variabilidade do comportamento compressivo dos solos tropicais;
11. A diagnose da compactação do solo em ambientes tropicais requer integração entre avaliações de campo e análises laboratoriais, com uso de indicadores estruturais e modelos preditivos.