

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos

Cezar Francisco Araujo Junior

**SISTEMA DE PASTEJO INTENSIVO IRRIGADO E ATRIBUTOS DE UM
ARGISSOLO VERMELHO DO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Belo Horizonte
2025

Cezar Francisco Araujo Junior

**SISTEMA DE PASTEJO INTENSIVO IRRIGADO E ATRIBUTOS DE UM
ARGISSOLO VERMELHO DO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Monografia de especialização apresentada ao Curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de especialista.

Orientador: Sérgio Henrique Godinho Silva

Belo Horizonte
2025

A663s
2025

Araujo Junior, Cezar Francisco.

Sistema de pastejo intensivo irrigado e atributos de um argissolo vermelho do noroeste do estado do Paraná [recurso eletrônico] / Cezar Francisco Araujo Junior. – 2025.

1 recurso online (45 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Sérgio Henrique Godinho Silva.

Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Bibliografia: f. 39-43.

Inclui apêndice e anexo.

1. Solo – Uso – Teses. 2. Solos – Composição – Teses. 3. Pastejo – Teses. 4. Solos irrigados – Teses. 5. Fluorescência – Teses. I. Silva, Sérgio Henrique Godinho. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 631.4:633.2.033(816.2)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
FOLHA DE APROVAÇÃO

NOME: CEZAR FRANCISCO ARAÚJO JÚNIOR, Nº. DE REGISTRO: 2024651040

TRABALHO FINAL: SISTEMA DE PASTEJO INTENSIVO IRRIGADO E ATRIBUTOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO DO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Trabalho de Conclusão da Especialização apresentado ao Curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, do Programa de Pós-graduação em Geografia, da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos.

APROVADO em 09 de julho de 2025, pela Orientação e Banca Examinadora constituída pelos Membros:

SERGIO HENRIQUE GODINHO SILVA - Orientador

MEMBROS DA BANCA:

Fábio Soares de Oliveira(UFMG);
Sérgio Henrique Godinho Silva(UFLA);
Kairo da Silva Santos(UFMG).



Documento assinado eletronicamente por Sérgio Henrique Godinho Silva, Usuário Externo, em 31/07/2025, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Fábio Soares de Oliveira, Professor(a), em 12/08/2025, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Kairo da Silva Santos, Usuário Externo, em 26/08/2025, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4403123 e o código CRC D35C2178.

Dedico este trabalho à minha esposa e aos nossos filhos por terem me acompanhado nesta jornada e terem me ajudado superar os desafios das aulas noturnas “*on-line*” pós-serviço.

AGRADECIMENTOS

Aos proprietários da área onde esse estudo foi desenvolvido, bem como ao seu gerente de produção José Junior por apoiar a coleta de amostras de solo e avaliação visual da estrutura do solo.

Ao professor Fábio Soares de Oliveira (Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências) pela coordenação primorosa do curso de especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de solos resultante do acordo de cooperação entre as universidades federais: UFRRJ, UFMG, UFV e UFRA.

Ao professor Sérgio Henrique Godinho da Silva (Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo) pela realização das análises de fluorescência de raios-X portátil e susceptibilidade magnética das amostras de solo e orientação do trabalho de conclusão do curso.

Ao Doutor Pedro Guglielmi, servidor do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, IAPAR-EMATER (IDR-Paraná) cedido à Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento do Paraná (SEAB) pelo auxílio no geoprocessamento e elaboração de mapas.

Aos inúmeros professores, pesquisadores e demais convidados do curso de especialização que contribuíram para o crescimento profissional.

O solo é uma fina camada sobre a superfície terrestre que desempenha diversas funções que permite a sobrevivência dos seres vivos e compreender os fatores da paisagem que contribuíram para suas variações no tempo e no espaço é garantir o melhor uso desse importante recurso natural.

RESUMO

O Sistema de Pastejo Intensivo (SPI) pode comprometer os atributos do solo pelo pisoteio animal caso a altura de entrada e saída da forrageira e o conteúdo de água no solo não sejam controlados no momento do pastejo. O solo e a água são recursos básicos que sustentam a vida no planeta e atuam como alicerces dos sistemas de produção de alimentos, fibras e energia. Neste sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar os atributos do solo relacionados a estrutura e caracterizar a composição química de amostras de solo coletadas em uma área cultivada com pastagem perene irrigada por pivô central. Em uma propriedade particular no município de Amaporã, Mesorregião noroeste do Estado do Paraná e na Microrregião de Paranaíba, doze pontos amostrais georreferenciados foram selecionados aleatoriamente em uma pastagem perene irrigada por pivô central localizado nas coordenadas geográficas (Latitude: -23,076846; Longitude: -52,747762) e altitude de 370 m acima do nível do mar para análise visual da estrutura do solo por meio do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES). Nestes pontos, 24 amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas, sendo 12 amostras da camada 0–10 cm e 12 amostras da camada de 20–30 cm de profundidade. O solo da área foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico (PVd), textura areia-franca na camada superficial, cultivado com pastagem perene capim-colonião (*Panicum maximum* Jacq.) cultivar BRS Quênia irrigada por pivô central. A caracterização física do solo incluiu análises de densidade de partículas e distribuição granulométrica de partículas, além dos atributos relacionados a estrutura do solo como: densidade, porosidade, conteúdo de água volumétrico e grau de compactação. A composição química das amostras de solo foi determinada por meio de espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (pXRF). A susceptibilidade magnética das amostras de solo foi determinada por meio de um magnetômetro. Os resultados da análise visual do solo indicaram que o índice de qualidade estrutural (IQEA) das amostras de solo avaliada por meio do DRES foi superior a $IQEA > 3$ em todos os pontos amostrais, o que indica que não foram observadas feições de degradação ou ausência de partículas primárias desagregadas em canais verticais da camada de solo (0–25 cm de profundidade). Silício (230 g kg^{-1}), alumínio (42 g kg^{-1}) e ferro (20 g kg^{-1}) foram os elementos químicos mais abundantes nas amostras de solo de ambas as camadas estudadas. A susceptibilidade magnética por unidade de massa (χ_{BF}) na terra fina seca em estufa

variou de 3,97 a 7,89 x 10⁻⁷ m³ kg⁻¹ com média aritmética de 5,42 x 10⁻⁷ m³ kg⁻¹ na camada de 0–10 cm de profundidade, sendo considerada baixa provavelmente em virtude do material de origem da área ser derivada do arenito Caiuá indicando baixa presença de minerais ferrimagnéticos nas diferentes frações do solo.

Palavras-chave: estrutura do solo; análise visual; fluorescência de raios-X; sistema irrigado; *Panicum maximum* Jacq.

ABSTRACT

Intensive Grazing System (SPI) can compromise soil attributes due to animal trampling if the entry and exit height of the forage and the water content in the soil are not controlled at the time of grazing. Soil and water are basic resources that sustain life on the planet and act as the foundations of food, fiber, and energy production systems. In this sense, the aim of this study was to evaluate soil attributes related to structure and characterize the chemical composition of soil samples collected in an area cultivated with perennial pasture irrigated by central pivot submitted to intensive grazing system. On a private farm at Amaporã County, northwest Mesoregion of the State of Paraná and in the Microregion of Paranavaí, twelve georeferenced sampling points were randomly selected in a perennial pasture irrigated by a central pivot located at the geographic coordinates (Latitude: -23.076846; Longitude: -52.747762) and altitude of 370 m above sea level for visual analysis of the soil structure through the Rapid Diagnostic of Soil Structure (DRES). In these sampling points, a total of 24 undisturbed soil samples were collected, encompassing 12 samples of the 0–10 cm layer and 12 samples of the 20–30 cm layer were collected in an area irrigated by a central pivot of private property in Amaporã County, northwest mesoregion of the state of Paraná and in the Paranavaí microregion. The soil in the study area was classified as *ARGISSOLO VERMELHO Distrófico*, with a sandy-loam texture, cultivated with perennial pasture irrigated by central pivot. Physical soil characterization includes particle density and particle size distribution analyzes in addition to attributes related to soil structure such as: soil bulk density, total porosity, volumetric water content and degree of compaction. The chemical composition of the soil samples was determined using a portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). The magnetic susceptibility of the soil samples was determined by a magnetometer. The results of the visual assessment of the soil indicated that the structural quality index of the soil samples evaluated by means of DRES was greater than 3 at all sampling points, which indicates that no features of degradation or absence of disaggregated primary particles were observed in vertical channels of the soil layer (0–25 cm deep). Silicon (230 g kg⁻¹), aluminum (42 g kg⁻¹) and iron (20 g kg⁻¹) were the most abundant chemical elements in the soil samples from both layers studied. The magnetic susceptibility per unit mass (χ_{BF}) in the oven-dried fine soil ranged from 3.97 to 7.89 x 10⁻⁷ m³ kg⁻¹ with an arithmetic mean of 5.42 x 10⁻⁷ m³ kg⁻¹ at 0–10 cm depth, being considered low probably because the soil parent

material of the area is derived from the Caiuá sandstone, indicating a low presence of ferrimagnetic minerals in the different soil particle size fractions.

Keywords: soil structure; visual assessment; X-ray fluorescence; irrigated system; *Panicum maximum* Jacq.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Representação dos sistemas pedológicos nas topossequências 1 e 2 do município de Amaporã, mesorregião Noroeste do Estado do Paraná. 15
- Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo no município de Amaporã, mesorregião Noroeste do Estado do Paraná. 20
- Figura 3 - Minitrincheira com dimensões de: 50 cm de largura, 50 cm de comprimento e 30 cm de profundidade (A) e extração da camada (B) para o diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES. 22
- Figura 4 - Espectrômetro de fluorescência de raios-X portátil (pXRF), Bruker®, modelo Tracer, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras -UFLA. 24
- Figura 5 - Magnetômetro, modelo MS2, Bartington®, laboratório do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - UFLA. 25
- Figura 6 - Índice de qualidade estrutural das amostras de solo avaliada por meio do método Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES, em doze pontos amostrais, camada de 0–25 cm de profundidade. 28
- Figura 7 - Mapa da distribuição de alumínio de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca em doze pontos amostrais, camada de 0–10 cm de profundidade. 31
- Figura 8 - Mapa da distribuição de alumínio de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca em doze pontos amostrais, camada de 20–30 cm de profundidade. 32
- Figura 9 - Teor de ferro total em amostras de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca em doze pontos amostrais, nas camadas de 0–10 cm e 20–30 cm de profundidade. 33
- Figura 10 - Susceptibilidade magnética de amostras de um ARGISSOLO VERMELHO, em doze pontos amostrais, camada de 0–10 cm de profundidade. 34
- Figura 11 - Relação entre a suscetibilidade magnética por unidade de massa (SM) em relação à altitude de coleta das amostras de solo. 35

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Fator de conversão para óxidos a partir dos dados elementares da fluorescência de raios-X portátil (pXRF). 24
- Tabela 2 - Atributos físico-hídricos e mecânicos de um ARGISSOLO VERMELHO submetido ao sistema de pastejo intensivo de capim-colonião irrigado por pivô central, nas camadas de 0–10 cm e 20–30 cm de profundidades. 27
- Tabela 3 - Análise descritiva da composição química de amostras de um ARGISSOLO VERMELHO, camadas 0–10 cm e 20–30 cm de profundidades. Determinadas por meio de fluorescência de raios-X portátil (pXRF). 30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PVd	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico
CTC	Capacidade de troca de cátions
Dp	Densidade de partículas sólidas do solo
Ds	Densidade do solo
DRES	Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo
pXRF	Espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X
GC	Grau de compactação do solo
PCZ	Ponto de carga zero
PTC	Porosidade total do solo calculada
pH	Potencial hidrogeniônico
SPII	Sistema de pastejo intensivo irrigado
SPD	Sistema plantio direto
Vc	Volume do cilindro

LISTA DE SÍMBOLOS OU FÓRMULAS

Al	Alumínio
As	Arsênio
Ca	Cálcio
Co	Cobalto
Fe	Ferro
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
MnO	Óxido de manganês
SiO ₂	Óxido de silício
TiO ₂	Óxido de titânio
Si	Silício
Ti	Titânio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Classificação de solos	16
2.2 Sistema de pastejo intensivo irrigado	17
2.3 Avaliação visual e atributos físicos do solo	18
2.4 Técnicas de fluorescência de raios-x (XRF) e susceptibilidade magnética	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Área de estudo	21
3.2 Módulo de pastejo estruturado	22
3.1.1 Coleta de amostras de solo	23
3.2 Análises de laboratório	24
3.2.1 Análises físicas	24
3.2.2 Análises químicas	25
3.2.3 Susceptibilidade magnética	26
3.2.4 Análise dos dados	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Camada de 20–30 cm de profundidade	35
4.2 Susceptibilidade magnética por unidade de massa, camada de 0–10 cm	35
5 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE A	44
ANEXO A	45

1 INTRODUÇÃO

O solo abriga uma imensa biodiversidade e inclui elementos chave para os ciclos básicos que sustentam a vida, sendo assim, um recurso natural considerado alicerce dos sistemas de produção. Os valores ecológicos do solo são frequentemente negligenciados nas decisões de gestão de políticas e conservação da natureza (Hotspots globais para a conservação da natureza do solo estão mal protegidos, 13 de outubro de 2022).

O solo com sua composição química, física e biológica tem participação fundamental no ciclo hidrológico entre a atmosfera, rios e riachos (hidrosfera), além da importância na regulação climática pela mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o solo é uma camada fina frágil de material existente sobre os substratos geológicos da Terra (litosfera), da qual depende grande parte da vida na Terra. Esta fina camada sobre a superfície terrestre está sujeita a formação e a degradação dependendo do uso e manejo da terra.

O sistema de pastejo intensivo de forrageiras perenes irrigado e rotacionado com plantas forrageiras de outono inverno pode contribuir para a intensificação do uso da terra na mesorregião noroeste paranaense. Por outro lado, o manejo inadequado dos animais e das forrageiras, sem respeitar a altura de manejo das forrageiras e a taxa de lotação relacionada pode comprometer as propriedades físicas do solo relacionadas a estrutura.

Os Argissolos derivados do arenito Caiuá na mesorregião noroeste do Paraná são considerados frágeis em virtude da baixa coesão entre partículas devido ao grande conteúdo de areia na superfície, baixo conteúdo de carbono orgânico total devida à baixa proteção física da matéria orgânica à decomposição microbiana, capacidade de troca de cátions e gradiente textural entre os horizontes superficial e subsuperficial em que o movimento de água pode ser tão lento o que favorece o escoamento superficial (COSTA et al., 2020; FIDALSKI; TORMENA, 2022).

No contexto de sistemas de pastejo intensivo irrigado, minimizar os impactos causados pelo pisoteio animal sobre o solo se torna essencial para a preservação dos recursos naturais solo e água. Assim, este estudo teve por objetivo caracterizar a composição química e os atributos físicos relacionados a estrutura de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico submetido ao sistema de pastejo intensivo irrigado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Classificação de solos

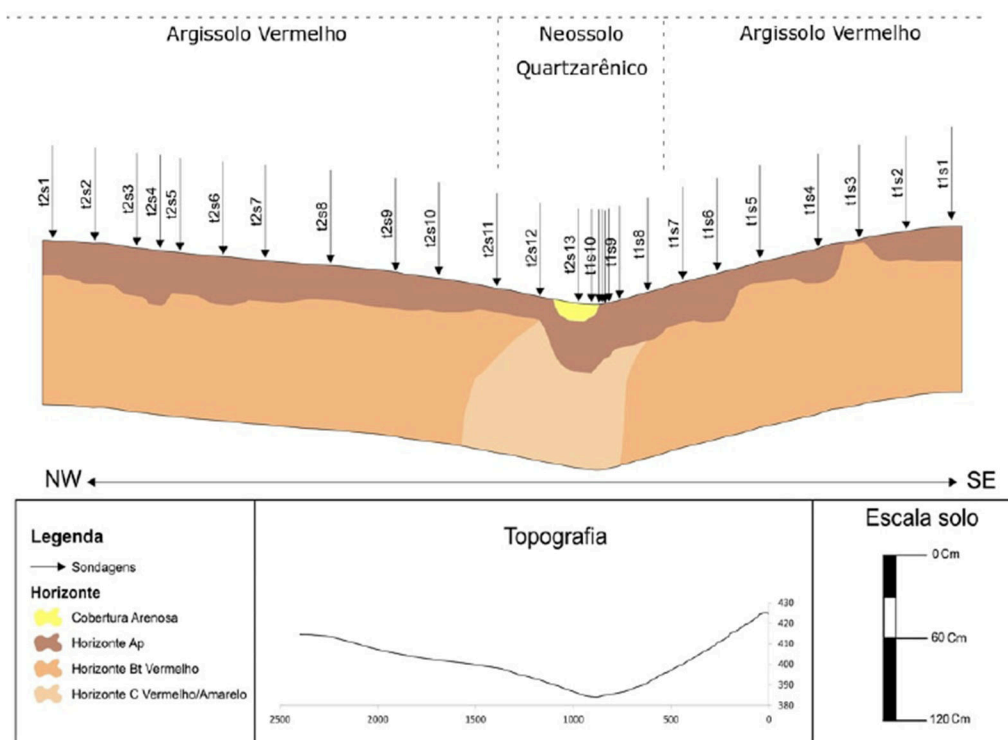
Os sistemas de classificação de solos foram criados para facilitar a organização de informações sobre os solos do planeta. No caso do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018), existem 13 ordens de solos, sendo que os Latossolos formam a classe de maior expressão geográfica do país (31,6 %), seguidos pelos Argissolos (26,8 %) (ANJOS et al., 2012). Enquanto os primeiros são altamente intemperizados, homogêneos e profundos, os Argissolos apresentam incremento de argila em subsuperfície, o que aumenta a capacidade de retenção de água em profundidade, e torna seu horizonte superficial, menos argiloso, mais susceptível à erosão (RESENDE et al., 2014).

O arenito da Formação Caiuá na mesorregião noroeste do Estado do Paraná corresponde a uma área de aproximadamente 70.000 km² e apresenta constituição com predomínio de quartzo que varia de 75 a 90 % do total da rocha, com presença de feldspatos, microclínio e plagioclásio com teores compreendidos entre 5 e 10 % (SILVA et al., 2010).

Os Argissolos são componentes principais das unidades de mapeamento de aproximadamente 15,53 % da área total do Estado do Paraná, com pouco mais de 31.000 km² (SANTOS et al., 2008). O mapa de solos do Estado do Paraná permitiu observar que os Argissolos Vermelhos Distróficos ocupam uma área de 847.046 hectares, correspondendo a 4,26 % da área total do estado, enquanto os Argissolos Vermelhos Eutróficos abrangem 617.590 hectares, o que equivale a 3,09 % da área total.

Em duas topossequências no município de Amaporã (PR), mesorregião noroeste Paranaense e na Microrregião de Paranavaí, Oliveira et al. (2020) verificaram que o sistema pedológico se encontra em avançado estado de evolução com sucessão de ARGISSOLO (horizontes Ap-Bt) para NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (Ap-C) no fundo de vale (Figura 1). Além disso, os autores concluíram que os processos de elutriação, eluviação e iluviação são os responsáveis pelos sistemas de transformação que ocorrem ao longo das duas topossequências.

Figura 1. Representação dos sistemas pedológicos nas topossequências 1 e 2 do município de Amaporã, mesorregião Noroeste do Estado do Paraná.



Fonte: "Adaptado de Oliveira et al., 2020"

2.2 Sistema de pastejo intensivo irrigado

O sistema de pastejo intensivo envolve uma série de variáveis interrelacionadas tais como a planta forrageira, o animal, clima e solo (SILVA et al., 2003). Estes autores observaram em um ARGISSOLO VERMELHO (44 dag kg^{-1} de argila) do município de Piracicaba (SP) aumentos de 88 % na resistência mecânica do solo à penetração (um penetrômetro manual com um diâmetro de cone basal de 1 cm) com o aumento na taxa de lotação de $4,42 \text{ UA ha}^{-1}$ para $5,68 \text{ UA ha}^{-1}$, o que sugere que o estado de compactação do solo em sistema de pastejo irrigado depende da taxa de lotação.

A forrageira perene *Panicum* (Syn. *Megathyrsus*) cultivar BRS Quênia é indicada para cultivo em todas as regiões do Estado do Paraná (GOBBI, 2024). Essa forrageira deve ser implantada por semente, com densidade de semeadura entre 3–4 kg por hectare de sementes puras viáveis, espaçamento entre linhas 20–25 cm, com profundidade de 2–5 cm em solos de média a alta fertilidade. A altura de manejo (lotação relacionada) indicada é entrada com 50–70 cm e saída de 25–35 cm.

O teor de carbono orgânico total é baixo nos solos da Formação Arenítica Caiuá, sendo responsável por 32–84 %, média de 52 % da capacidade de troca de cátions - CTC desses solos (COSTA et al., 2020). Além disso, estes autores demonstraram que a matéria orgânica do solo é responsável por 24–67 % da CTC, após avaliação de 34 amostras de solos dessa formação.

A CTC restante deve ser atribuída às pequenas quantidades de argilominerais 2:1 interestratificados ou não com caulinita. Óxidos de ferro e alumínio não apresentam valores expressivos de CTC devido ao seu pH no ponto de carga zero ser > 7, gerando cargas positivas nas suas superfícies (COSTA et al., 2020).

2.3 Avaliação visual e atributos físicos do solo

Métodos de avaliação visual do solo podem ser úteis para detectar mudanças na condição física do solo não detectadas pelos atributos físicos quantitativos (SOUZA et al., 2025). Esses métodos têm sido propostos como uma alternativa de baixo custo e prática aos de avaliação da qualidade estrutural do solo (SOUZA et al., 2025).

O planejamento do uso do solo tem a finalidade de garantir um aproveitamento do solo adequado à localidade, considerando-se as propriedades do solo, a declividade, a intensidade das chuvas e os sistemas de produção (DERPSCH et al., 1990) de forma a manter a qualidade ambiental local e regional. O uso não racional da terra expõe o solo aos agentes erosivos e potencializa a degradação pelo processo de erosão do solo.

A compactação do solo devido ao pisoteio animal é um dos fatores responsáveis pela degradação da qualidade física dos solos sob pastagem (SILVA et al., 2003; PIRES et al., 2012; ARAUJO-JUNIOR, 2017; ARAUJO-JUNIOR; BONETTI, 2018).

Em contrapartida no sistema plantio direto — em que o revolvimento do solo é mínimo, restrito às linhas de semeadura —, a manutenção de cobertura permanente na superfície e a diversificação de culturas com uso do próprio sistema de raízes das plantas permite escarificação biológica, reciclar nutrientes, minimizar a emissão de gases de efeito estufa e aumentar os estoques de carbono.

Além dos efeitos de solos e manejos adotados, erosões, que inclusive atingem os núcleos urbanos são os principais problemas ambientais na mesorregião noroeste paranaense desde o início da ocupação da região (OLIVEIRA et al., 2020).

2.4 Técnicas analíticas de fluorescência de raios-x (XRF) e susceptibilidade magnética

Fluorescência de raios-X (XRF) é uma técnica analítica não destrutiva usada para determinar a composição química dos materiais. As técnicas de fluorescência de raios-X portátil (pXRF), que permitem análises no campo, fornecem abordagens analíticas viáveis e eficazes para atender às necessidades de análise no local para muitos tipos de amostras ambientais (KALNICKY; SINGHVI, 2001). Segundo estes autores, os átomos emitem fluorescência em energias específicas para cada elemento químico quando excitados por raios-X e a detecção de fótons fluorescentes específicos permite a análise qualitativa e quantitativa da maioria dos elementos em uma amostra.

A fluorescência de raios-X (XRF) se baseia na medição das intensidades de emissão de raios-X características de cada elemento químico que compõe a amostra (RIBEIRO et al., 2017). Além disso, o uso dessa técnica pode contribuir substancialmente para análises rápidas, precisas, de baixo custo, em campo e ambientalmente correta (SILVA et al., 2021).

As análises pXRF são mais rápidas do que os métodos tradicionais de laboratório de química úmida e podem permitir investigações mais profundas dessas relações, especialmente estudando vários elementos, como: Rubídio (Rb), Ítrio (Y) e Estrôncio (Sr), entre outros, que até então eram menos estudados devido às análises difíceis e caras por meio de métodos convencionais (SILVA et al., 2021).

Em cinco Latossolos muito argilosos (teores de argila entre 73–80 dag kg⁻¹) do estado do Paraná, LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (Londrina e Mauá da Serra), LATOSSOLO VERMELHO (Ivaiporã), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (Imbituva), LATOSSOLO BRUNO (Guarapuava), derivados de rochas eruptivas (basalto, diabásio e riolito), os teores de Fe₂O₃ determinados por fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF) variaram de 12,8 % para o LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura muito argilosa do município de Imbituva a Fe₂O₃ = 24,2 % para o LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, textura muito argilosa do município de Londrina (THOMAZ et al., 2022). Os autores ressaltaram que os teores de óxidos de silício, alumínio e ferro foram associados a diferentes mecanismos de desagregação de agregados e estes se relacionaram aos índices de estabilidades de agregados.

Estudo recentes demonstraram que o pXRF pode identificar as principais assinaturas químicas dos materiais de origem do solo, ligando o solo ao seu substrato original (MANCINI et al., 2019). Além disso, as composições químicas de amostras de solo determinadas por meio do pXRF podem ser úteis na predição da textura do solo (NACHTIGALL et al., 2025).

Em um estudo com seis solos com variáveis graus de intemperismo, distribuição granulométrica de partículas, estrutura e conteúdo de água para determinar os óxidos por meio de pXRF, Ribeiro et al. (2018) verificaram que os valores obtidos de Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 e TiO_2 em amostras de terra fina seca ao ar foram superiores aos determinados diretamente no perfil do solo. Além disso, os autores ressaltaram que amostras peneiradas e homogeneizadas em laboratório fornecem uma matriz mais uniforme para a realização dos ensaios de fluorescência de raios-X.

A susceptibilidade magnética é um atributo do solo que reflete a composição de minerais ferrimagnéticos, nas diferentes frações do solo. No Estado do Paraná, aproximadamente 50 % dos solos apresentam magnetização espontânea (SILVA et al., 2010). Estes autores demonstraram que a susceptibilidade magnética por unidade de massa apresenta estreita relação com os teores de Fe após ataque sulfúrico e com os atributos mineralógicos dos diferentes materiais geológicos paranaenses.

Os fatores principais que influenciam o magnetismo de um mineral são a substituição isomórfica Fe por um elemento químico diamagnético (Al, Mg, Zn e etc.) e o tamanho das partículas, por exemplo, magnetitas primárias que ocorrem em frações grosseiras dos solos apresentam estrutura de multidomínios magnéticos (COSTA; BIGHAM, 2009).

A magnitude da susceptibilidade magnética por unidade de massa (χ_{BF}) é proporcional a concentração dos minerais ferrimagnéticos (SOUZA JUNIOR et al., 2010). Estes autores estudaram a χ_{BF} e os minerais ferrimagnéticos de 32 amostras (23 derivadas de rochas eruptivas, oito de rochas sedimentares e uma de granito porfíritico) com teores de argila entre 34–88 dag kg^{-1} e variações na concentração de minerais ferrimagnéticos do horizonte B de solos do Estado do Paraná e verificaram valores de 16 a $8.077 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ na terra fina seca ao ar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área de pastagem perene irrigada por pivô central, cujo centroide da área se localiza na Latitude -23,076846, Longitude: -52,747762 e altitude de 370 m acima do nível do mar, de uma propriedade rural particular inserida no município de Amaporã, mesorregião noroeste do Estado do Paraná e na microrregião de Paranaíba (Figura 2).

A geologia do município de Amaporã, no noroeste do Paraná, é caracterizada por solos arenosos, derivados principalmente do Arenito Caiuá, do Grupo São Bento, do Cretáceo. Essa composição torna os solos da região naturalmente pouco férteis e suscetíveis à erosão, exigindo práticas intensivas de conservação e adubação.

As cartas geomorfológicas do Estado do Paraná indicam que o município de Amaporã localiza-se na sub-unidade morfoescultural denominada Planalto de Paranaíba, situada no Terceiro Planalto Paranaense, apresenta dissecação baixa e ocupa uma área de 6.673,54 km², (Santos et al., 2006).

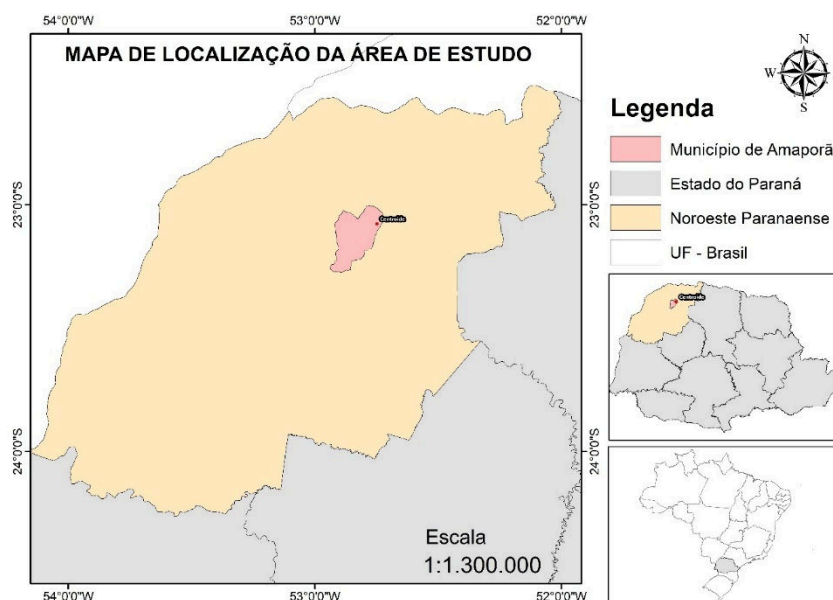
A classe de declividade predominante é menor que 6 % em uma área de 2.798,58 km². Em relação ao relevo apresenta um gradiente de 340 metros com altitudes variando entre 240 m (mínima) e 580 m (máxima) acima do nível do mar). As formas predominantes são topos aplainados, vertentes convexas e vales em “V” aberto, modeladas em rochas da Formação Caiuá (Santos et al., 2006).

O solo da área de estudo foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). O solo é derivado de arenitos pertencentes ao Grupo Bauru (Fernandes e Coimbra, 2000), formação de arenito Caiuá que cobre uma área equivalente a 370.000 km² (30.000 km² no Paraná) no sul do Brasil (Costa et al., 2020). Segundo estes autores, nódulos de concreções de quartzo e ferro dominam as frações de areia e silte

A mesorregião noroeste Paranaense possui clima Cfa (clima temperado úmido com verão quente) segundo a classificação de Köppen (Nitsche et al., 2019). A precipitação média anual é de 1,495 mm, sendo os meses de maior precipitação janeiro (210 mm) e menor em agosto (47 mm).

A temperatura média anual varia entre 21 e 22°C, com o mês mais quente (fevereiro) atingindo entre 24 e 25°C e o mês mais frio (julho) entre 17 e 18°C. A umidade relativa do ar média anual é de 75 %.

Figura 2. Mapa de localização da área de estudo no município de Amaporã, mesorregião Noroeste do Estado do Paraná.



Fonte: Pedro Guglielmi 2025.

3.2 Módulo de pastejo estruturado

A propriedade utiliza um sistema de pastejo estruturado de alta taxa de lotação, aproximadamente 10 unidades animal por hectare com uso combinado de cercas fixas (“cercas guias”) e móveis. A montagem dos piquetes é feita diariamente com cercas móveis, seguindo o nível do terreno o que contribui para a conservação do solo e da água.

O pastejo se inicia no terço inicial da curva com altura de entrada de 70 cm e à medida que os animais consomem o pasto disponível, a altura de saída por volta de 35 cm, a cerca móvel vertical é aberta, permitindo o avanço controlado dos animais.

No outono/inverno de cada ano, a pastagem perene de verão foi sobressemeada em plantio direto com mix de forrageiro composto por aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) cultivar Iapar 61 Ibiporã, azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench) cultivar IPR 91 Baili, ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.), ervilhaca peluda (*Vicia vilosa*), nabo forrageiro (*Brassica napus* L.) cultivar IPR 116 e centeio IPR 89. Na adubação de base na semeadura do mix forrageiro foi utilizado um fertilizante orgânico peletizado na dose de 325 kg por

hectare.

Em abril do ano de 2021, a área foi subsolada com o auxílio de um subsolador Panter®, modelo Terramax Ouro com quatro hastes espaçadas de 65 cm, largura útil de trabalho 2,6 m e massa total de 1.800 kg. A largura das hastes do equipamento é 6 cm, a qual foi utilizada para definir a profundidade de trabalho de 45 cm. O conteúdo de água no solo no momento do início da operação foi de $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na camada de 0–0,2 m de profundidade.

O trator agrícola utilizado para tracionar o subsolador foi um New Holland®, modelo T6.130 (6 cilindros) com 132 cv de potência bruta no motor (97,09 kW), 4 x2 TDA com rodados simples, e massa total de 5.900 kg, sendo admitido 35 % no eixo dianteiro (2.065 kg) e 65 % (3.835 kg) no eixo traseiro.

Os pneus dianteiros utilizados no trator foram do tipo diagonal, com dimensões 14.9–28, marca Pirelli modelo TM 95. Este pneu é considerado pneu de tração, diagonal, perfil normal com largura de 43 cm e pressão de inflação de 172,37 kPa (25 psi). Os pneus traseiros foram com dimensões de 23.1–30, marca Goodyear modelo R1 Dyna Torque com diâmetro do aro de 75 cm, pneu de tração, diagonal, perfil normal inflado na pressão de 199,95 kPa (29 psi).

No mês de agosto dos anos 2021, 2022 e 2023 foi aplicado pó de rocha obtido a partir de moagem de rochas eruptivas do Município de Maringá (PR) na dose 6 toneladas de por hectare (acumulado 18 toneladas/ha) com 80 % das partículas menores que 0,2 mm (200 micrômetros).

3.1.1 Coleta de amostras de solo

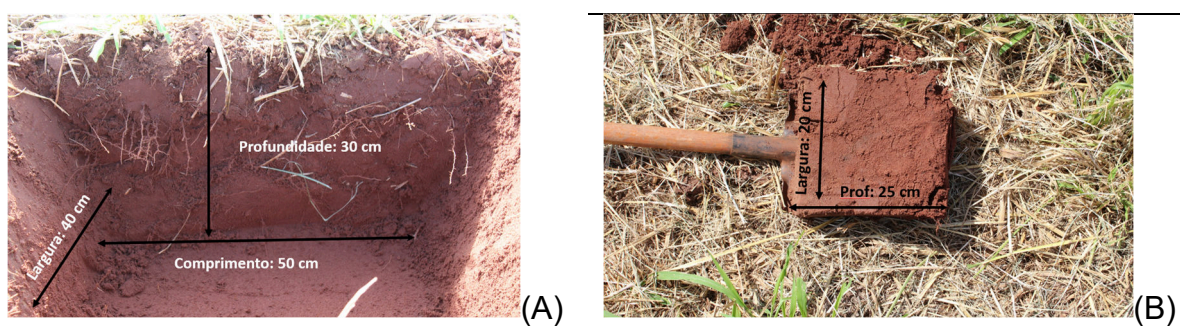
Em uma área de pastagem perene capim-colonião (*Panicum maximum* Jacq.) cultivar BRS Quênia de 78 hectares irrigada por pivô central, doze pontos amostrais foram definidos aleatoriamente para avaliação por meio do método diagnóstico rápido da estrutura do solo – DRES (RALISCH et al., 2017). Para a avaliação DRES, minitrincheiras com dimensões de 50 cm de comprimento, 50 cm de largura e 30 cm de profundidade foram abertas com o auxílio de um enxadão e pá de corte reta (Figura 3).

Em seguida, uma amostra de solo com dimensões de 10 cm de espessura, 20 cm de largura e 25 cm de profundidade foi extraída de uma das paredes da minitrincheiras (Figura 3). Esta amostra de solo foi colocada em uma bandeja plástica

(dimensões 45 cm de comprimento por 30 cm de largura e 10 cm de altura) para manipulação e avaliação das feições da estrutura do solo.

Nestes mesmos pontos, um total de 24 amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em cilindros de inox com 100 cm³ de capacidade das camadas de 0–10 cm e 20–30 cm de profundidade. Estas profundidades foram selecionadas, pois para a o DRES a camada avaliada deve ser 0–25 cm e foram verificadas a camada de máxima resistência mecânica do solo à penetração do cone conforme estudos prévios.

Figura 3. Minitrincheira com dimensões de: 50 cm de largura, 50 cm de comprimento e 30 cm de profundidade (A) e extração da camada (B) para o diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3.2 Análises de laboratório

3.2.1 Análises físicas

As amostras de solo foram coletadas em cada ponto amostral e transportadas para os laboratórios de análises química e física do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, IAPAR-EMATER (IDR-Paraná) em Londrina, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de malha de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

A densidade de partículas sólidas do solo foi obtida por meio do método do balão volumétrico (FLINT; FLINT, 2002) cujo as amostras de solo foram secas em estufa a 105–110 °C durante 72 h e passada em peneira com malha de abertura de 2 mm para a obtenção da terra fina seca em estufa – TFSE.

A densidade do solo (D_s , g cm⁻³) foi calculada por meio da equação 1: $D_s = M_s/V_c$, em que, M_s é a massa do solo seco e V_c é o volume do cilindro pelo método

do anel volumétrico (FLINT; FLINT, 2002). A porosidade total (PT, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi calculada utilizando-se a equação 2: $PT = 1 - D_s/D_p$, em que, D_s é a densidade do solo e D_p a densidade de partículas do solo.

A análise granulométrica foi realizada em amostras de solo seca ao ar (TFSA) pelo método da pipeta (DAY, 1965), com adição de areia grossa e agitação lenta com tempo de agitação mecânica de 16 h (GHOMANN; RAIJ, 1977) por meio de agitador recíprocante (MIYAZAWA; BARBOSA, 2011).

3.2.2 Análises químicas

No laboratório, as amostras de solo com estrutura preservada foram secas em estufa a 105°C por 72 horas. Em seguida, estas amostras foram removidas dos cilindros, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para a obtenção da terra fina seca em estufa (TFSE). Estas amostras foram enviadas ao Laboratório de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal de Lavras (UFLA) para uso do espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X - pXRF, Bruker®, (modelo Tracer 5g, Bruker Analytical Instrumentation, Billerica, MA, USA) (Figura 3).

O equipamento possui tubos de 50 KeV e $100 \mu\text{A}$ (SILVA et al., 2023), o que possibilitou a detecção e quantificação dos teores totais dos seguintes elementos: alumínio - Al, arsênio - As, bário - Ba, cálcio - Ca, cério - Ce, cobalto - Co, cromo - Cr, cobre - Cu, ferro - Fe, gálio - Ga, potássio - K, manganês - Mn, molibdênio - Mo, nióbio - Nb, níquel - Ni, fósforo - P, chumbo - Pb, rubídio - Rb, silício - Si, Sr, Th, Ti, Y, Zn, e Zr.

A partir dos dados elementares de alumínio (Al), cálcio (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg), silício (Si) e titânio (Ti) os valores foram convertidos a óxidos por meio do fator de conversão para cada elemento (Tabela 1).

As leituras das amostras para obtenção dos teores totais dos elementos nos solos foram feitas com duração de 60s, utilizando o modo "Soil" no software integrado Geochem, em um espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (Bruker Analytical Instrumentation, modelo Tracer 5g, Billerica, MA, USA) (Figura 4). Essa metodologia é abordada em Silva et al. (2021). Essa análise possibilitou a detecção e quantificação dos seguintes elementos: Al, As, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Si, Sr, Th, Ti, Y, Zn, e Zr.

Figura 4. Espectrômetro de fluorescência de raios-X portátil (pXRF), Bruker®, modelo Tracer, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - UFLA.



Foto: Sérgio Henrique Godinho Silva

Tabela 1 - Fator de conversão para óxidos a partir dos dados elementares da fluorescência de raios-X portátil (pXRF).

Elemento	Óxido	Fator de conversão
Al	Al ₂ O ₃	1,889
Ca	CaO	1,399
Fe	Fe ₂ O ₃	1,138
Mg	MgO	1,658
Si	SiO ₂	2,055
Ti	TiO ₂	1,668

3.2.3 Susceptibilidade magnética

A susceptibilidade magnética por unidade de massa (χ_{BF}) foi determinada em aproximadamente 10 g de terra fina seca em estufa (TFSE) que foi transferida para o tubo de teste, o qual foi inserido no magnetômetro Bartington®, modelo MS2, com um sensor MS2B (Bartington Instruments Ltd., Oxford, Reino Unido).

A susceptibilidade magnética (χ) da TFSE foi determinada em baixa frequência (0,47 kHz) (χ_{lf}) e alta frequência (4,7 kHz) (χ_{hf}). A susceptibilidade dependente da frequência (χ_{fd}) foi calculada conforme Equação 1.

$$X_{fd} = X_{lf} - X_{hf} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que,

X_{fd} é a susceptibilidade dependente da frequência, %. Esses parâmetros foram usados para fornecer informações sobre partículas magnéticas e a proporção de partículas superparamagnéticas (SP).

Figura 5. Determinador de susceptibilidade magnética, modelo MS2, Bartington®, laboratório do DCS, Universidade Federal de Lavras - UFLA.



Fonte: Sérgio Henrique Godinho Silva

3.2.4 Análise dos dados

Por estatística descritiva, determinaram--se a média aritmética, o desvio-padrão amostral, valores máximo e mínimo por meio do software Sigma Plot, versão 13.0 *Acad Edition* (Código da licença 54D84F44-1DF191EF).

A partir do coeficiente de variação (CV), o grau de variabilidade desses valores foi analisado com base na classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), que sugerem os limites: baixa CV < 12 %, média: $12 \leq CV \leq 52$ % e alta variabilidade: CV > 52 % para as propriedades.

A partir dos dados de pXRF, mapas da variabilidade espacial foram criados para os teores de silício e alumínio para toda a área de estudo por meio do método Multilevel splines, do software QGIS (2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise estatística descritiva da caracterização física do solo (densidade de partículas e granulometria) e dos atributos relacionados a estrutura do solo estão apresentados na Tabela 2. Como uma análise geral desses dados, verifica-se que as propriedades físicas densidade de partículas, areia total, densidade do solo, grau de compactação e porosidade total na camada de 0–10 cm de profundidade apresentaram valores de coeficiente de variação inferiores a 12 % e, portanto, uma variabilidade baixa considerando os critérios de Warrick e Nielsen (1980).

Os valores de densidade de partículas encontrados são próximos ao valor do peso específico do quartzo ($2,65 \text{ kg dm}^{-3}$) mineral que predomina na fração areia e fração que predomina nos solos avaliados em relação às frações silte e argila.

Na Tabela 2, observa-se que os teores de argila variaram entre 5 dag kg^{-1} (valor mínimo 0–10 cm) a 13 dag kg^{-1} (valor máximo 20–30 cm) valores característicos de solos de textura arenosa. Argila, silte e conteúdo de água no momento da coleta das amostras de solo com estrutura preservada apresentaram variabilidade consideradas médias (WARRICK; NIELSEN, 1980) com valores do coeficiente de variação entre 26,4–32 % (Tabela 2).

Pelos dados apresentados na Tabela 2 nota-se ainda que houve um aumento expressivo de 55 % no conteúdo da fração argila da camada de 0–10 cm de profundidade (Média $9,54 \text{ dag kg}^{-1}$) para a camada de 20–30 cm de profundidade (Média 12 dag kg^{-1}) o que é um indício da confirmação da ocorrência de Argissolos na área (incremento de argila em profundidade), uma vez que essa profundidade ainda contempla zona de transição entre horizontes A e B.

Os resultados apresentados na Tabela 2, são semelhantes aos observados por Fidalski e Tormena (2022) para um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico do município de Alto Paraná na mesorregião noroeste Paranaense cultivado com laranja e gramíneas nas entrelinhas. Esses autores observaram valores médios para a densidade máxima do solo ou a densidade de referência a 200 kPa variaram de $1,58$ – $1,65 \text{ kg dm}^{-3}$ em três posições de amostragem (projeção da copa da laranja, linha de tráfego das máquinas e entrelinhas) nas camadas 0–10 cm e 10–20 cm de profundidade. Além disso, ressaltaram que o preparo do solo é desnecessário para a implantação de pomares de laranja nessa região considerando a qualidade do solo.

Tabela 2 - Atributos físico-hídricos e mecânicos de um ARGISSOLO VERMELHO submetido ao sistema de pastejo intensivo de capim-colonião irrigado por pivô central, nas camadas de 0–10 cm e 20–30 cm de profundidades.

Atributos do solo	Mínimo	Média	Máximo	Desvio	C.V. (%)
	Camada de 0–10 cm de profundidade				
Dens. de partículas (kg dm ⁻³)	2,55	2,56	2,59	0,014	0,5 %
Argila (dag kg ⁻¹)	5	9,54	13	2,52	26,4 %
Silte (dag kg ⁻¹)	1	1,03	2	0,33	32,0 %
Areia total (dag kg ⁻¹)	85	89,38	94	2,56	2,9 %
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,41	1,55	1,69	0,08	5,2 %
Grau de compactação (%)	74	82	89	4,33	5,3 %
Porosidade total (cm ³ cm ⁻³)	0,36	0,4130	0,47	0,0336	8,1 %
Umidade atual (cm ³ cm ⁻³)	0,08	0,1420	0,23	0,0384	27,0 %
Camada de 20–30 cm de profundidade					
Dens. de partículas (kg dm ⁻³)	2,50	2,64	2,87	0,05	2,05 %
Argila (dag kg ⁻¹)	7	12	13	2,61	26,4 %
Silte (dag kg ⁻¹)	1	1	1	0,25	32,0 %
Areia total (dag kg ⁻¹)	83	87	92	2,54	2,9 %
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,53	1,63	1,73	0,05	3,07 %
Grau de compactação (%)	80	86	91	2,85	3,31 %
Porosidade total (cm ³ cm ⁻³)	0,35	0,38	0,42	0,02	5,26 %
Umidade atual (cm ³ cm ⁻³)	0,08	0,14	0,23	0,04	27,43 %

θ : Umidade atual é conteúdo de água volumétrico no momento da amostragem.

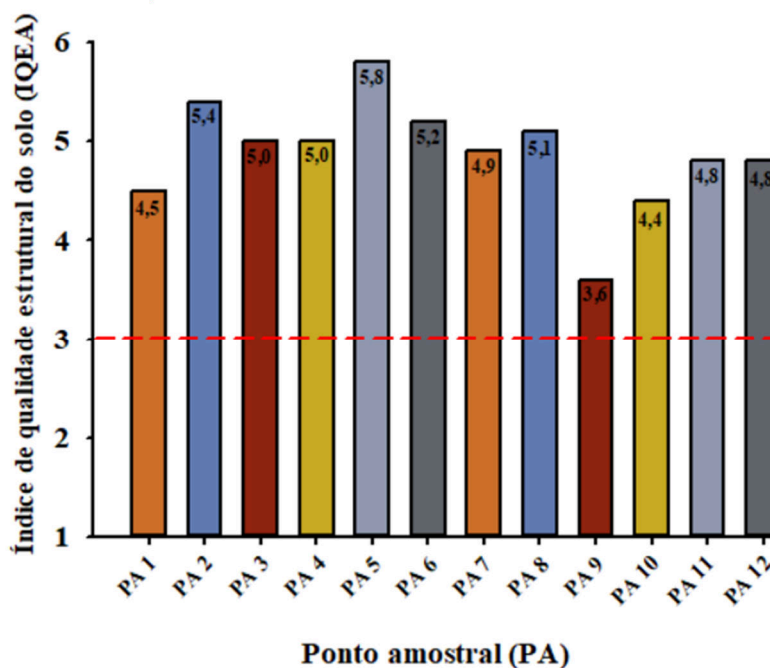
O grau de compactação igual a 74 % observado na camada de 0–10 cm é considerado baixo em relação ao nível que restringe o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, o que indica que o manejo adotado na área tem promovido uma boa qualidade física do solo nessa profundidade. Para essa mesma classe e camada de solo, Fidalski e Tormena (2022) registraram valores de graus de compactação de 90–92 % na projeção da copa das laranjeiras, 102–103 % na linha de tráfego de máquinas e equipamentos, e 97–100 % nas entrelinhas vegetadas com gramíneas.

Os valores de densidade do solo do presente estudo foram considerados baixos variando de 1,41–1,69 kg dm⁻³ na camada de 0–10 cm de profundidade (Tabela 2). Os resultados quantitativos de atributos do solo como a densidade e grau de compactação confirmam os índices de qualidade estrutural por meio de análise visual (Figura 6).

O conteúdo de água volumétrico no momento da amostragem apresentou CV = 27,04 % na camada de 0–10 cm de profundidade (Tabela 2), sendo considerado com alta variabilidade dos dados, o que indica desuniformidade no armazenamento de água no solo, o que pode ser devido ao pastejo dos animais na área o que promove deposição de resíduos diferenciada e à variabilidade encontrada em solos irrigados por sistema de pivô central conforme indicado por Silva et al. (2003).

O índice de qualidade estrutural das amostras de solo avaliada por meio do método DRES foi superior a 3 nos doze pontos amostrais (Figura 6), o que indica que não foram observados visualmente feições de degradação da camada de solo 0–25 cm de profundidade conforme os critérios estabelecidos por Ralisch et al. (2017). Os autores sugerem que areia solta no sentido vertical do perfil do solo indica evidências de degradação.

Figura 6. Índice de qualidade estrutural das amostras de solo avaliada por meio do método Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES, em doze pontos amostrais, camada de 0–25 cm de profundidade.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Os resultados da composição química de vinte quatro amostras de um ARGISSOLO VERMELHO submetido ao pastejo intensivo e irrigado por pivô central estão apresentados na Tabela 3. Silício, alumínio e ferro foram os elementos químicos mais abundantes nas amostras de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca do noroeste paranaense.

Em cinco latossolos do estado do Paraná, derivados de rochas eruptivas (basalto, diabásio e riolito) com teores de argila variando entre 73–80 dag kg⁻¹, os teores de Fe₂O₃ determinados por fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF) variaram de 12,8 % para o LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura muito argilosa do município de Imbituva a Fe₂O₃ = 24,2 % para o LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, textura muito argilosa do município de Londrina (Thomaz et al., 2022).

Na camada de 0–10 cm de profundidade, as concentrações de alumínio no solo variaram de 26.229–44.778 mg/kg com uma média de 37.264,83 mg/kg e desvio-padrão de 6.513,82 mg/kg (Tabela 3). O valor máximo representa 1,7 vezes a concentração mínima, portanto, indicando uma variação significativa na área, provavelmente relacionada à composição do solo, ao relevo da área de estudo, aos resíduos adicionados e ao pH do solo, as quais em área de pastagem podem ser significativamente alterados pela quantidade, qualidade e deposição de fezes e urinas dos animais. Outro aspecto que merece ser mencionado com relação à concentração de alumínio, é que as concentrações aumentam ligeiramente na camada 20–30 cm em relação a camada 0–10 cm de profundidade (Tabela 3).

As concentrações de Magnésio nas amostras de solo coletadas da camada de 0–10 cm de profundidade variaram de 7.047–13.776 mg/kg com uma média de 10.722,17 mg/kg e desvio-padrão de 2.064,86 mg/kg (Tabela 3)

O conteúdo total de silício variou de 220.063–251.870 mg/kg na camada de 0–10 cm de profundidade (Tabela 3). Os maiores valores foram obtidos nos pontos amostrais: PA 2 com 247.231 mg/kg e PA 12 com 251.870 mg/kg ambos localizados no terço inferior da área estudada. Por outro lado, os menores valores foram obtidos nos pontos amostrais: PA 6 com 220.138 mg/kg e PA 9 com 220.063 mg/kg localizados a leste e oeste da área de estudo (mapa não apresentado).

Os teores de ferro total variaram de 12.497–25.754 mg kg⁻¹ na camada de 0–10 cm de profundidade e de 12.753–25.985 mg kg⁻¹ na camada de 20–30 cm (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise descritiva da composição química de amostras de um ARGISSOLO VERMELHO, camadas 0–10 cm e 20–30 cm de profundidades. Determinadas por meio de fluorescência de raios-X portátil (pXRF).

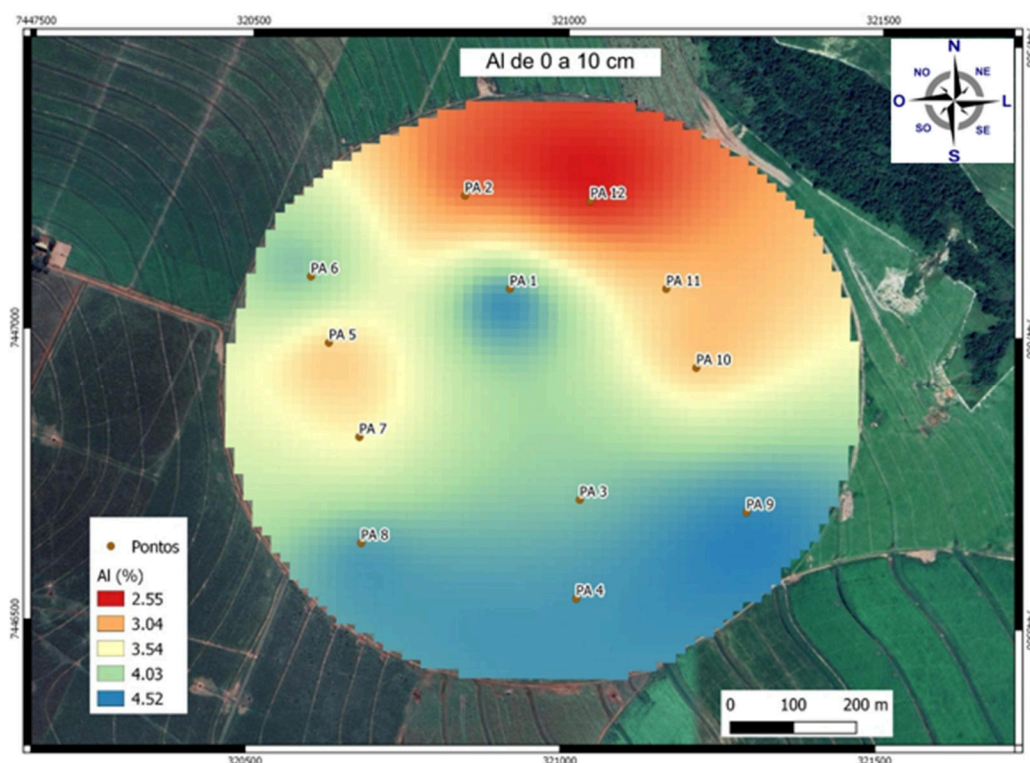
Elemento químico	Mínimo	Máximo	Média	Desvio
	Concentração, mg/kg			
Alumínio (mg/kg)	26.229	44.778	37.264,83	6.513,82
Magnésio (mg/kg)	7.047	13.776	10.722,17	2.064,86
Silício (mg/kg)	220.063	251.870	232.341,5	9922,26
Ferro (mg/kg)	12.497	25.754	19.512,17	4.220,48
Óxidos (%)				
Al ₂ O ₃	4,96	8,40	7,04	1,23
SiO ₂	45,2	51,8	47,7	2,04
Fe ₂ O ₃	1,42	2,93	2,22	0,48
Camada 20–30 cm de profundidade				
	Concentração, mg/kg			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio
Alumínio (Al)	34.940	56.446	46.220	6.500,83
Magnésio (Mg)	5.910	11.802	8.408	2.022,81
Silício (Si)	219.799	252.546	228.566	10.214,22
Ferro (Fe)	12.753	25.985	21.014,0	4.216,05
Óxidos (%)				
Al ₂ O ₃	6,60	10,7	8,73	1,23
SiO ₂	45,2	46,9	45,2	2,09
Fe ₂ O ₃	1,45	2,96	2,39	0,48

Os teores de óxidos de alumínio (Al₂O₃) variaram de 4,96–8,40 % na camada de 0–10 cm e 6,60–10,7 % na camada de 20–30 cm de profundidade (Tabela 3). Nos Latossolos muito argilosos derivados de rochas eruptivas (basalto, diorito e diabásio) do estudo de Thomaz et al. (2022), os teores de Al₂O₃ variaram de 18,3 % do município de Ivaiporã a 27 % do município de Imbituva.

A figura 7, mostra a distribuição do teor total de alumínio no solo da área de estudo na profundidade 0–10 cm. Observa-se que os maiores teores foram

observados nos pontos amostrais (PA3, PA4, PA8 e PA9) no terço superior da área de estudo. Por outro lado, os menores teores foram observados nos pontos amostrais (PA2, PA10, PA11 e PA12) no terço inferior da área de estudo do pivô central (Figura 8).

Figura 7. Mapa da distribuição de alumínio de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca em doze pontos amostrais, camada de 0–10 cm de profundidade.

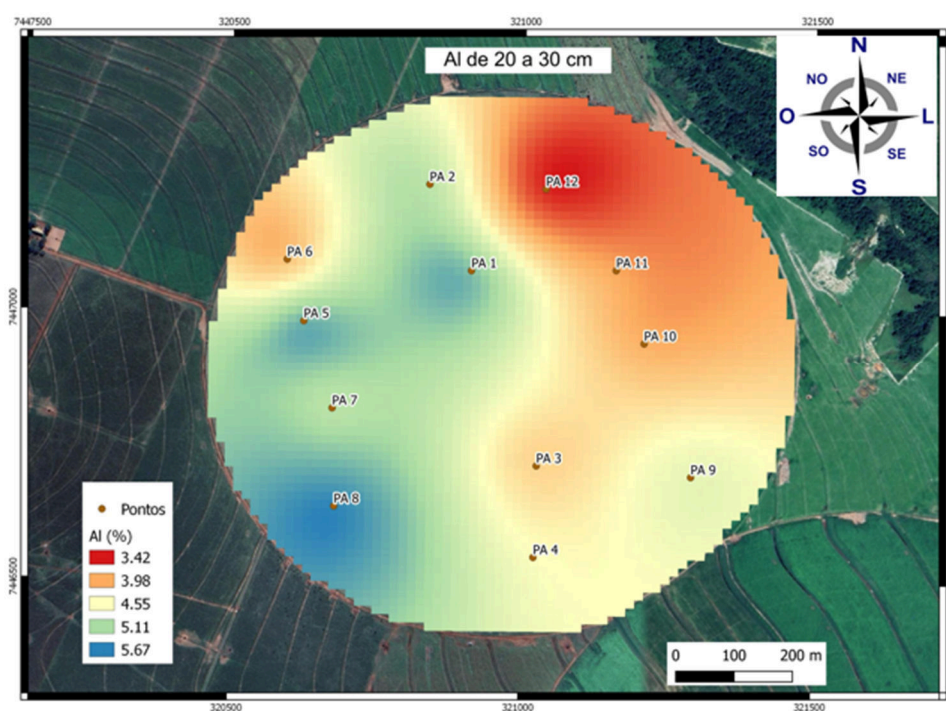


Fonte: Sérgio Henrique Godinho Silva, 2025.

4.1 Camada de 20–30 cm de profundidade

As concentrações de alumínio na camada de 20–30 cm de profundidade variaram de 34.940–56.446 mg/kg com uma média de 46.220 mg/kg e desvio-padrão de 6.500,83 mg/kg (Tabela 3). O valor máximo representa 1,62 vezes a concentração mínima, portanto, indicando uma variação significativa na área mesmo em subsuperfície.

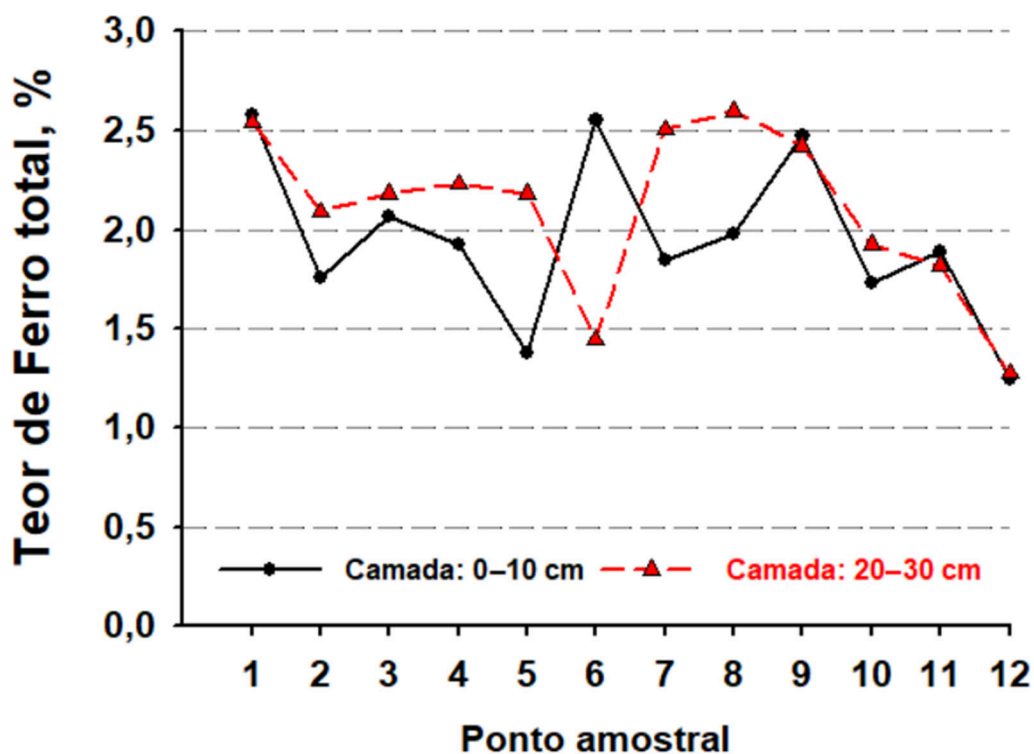
Figura 8. Mapa da distribuição de alumínio de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca em doze pontos amostrais, camada de 20–30 cm de profundidade.



Fonte: Sérgio Henrique Godinho Silva, 2025.

A figura 9 demonstra os teores de ferro nos doze pontos amostrais nas camadas de 0–10 cm e 20–30 cm de profundidade. Os resultados permitem observar valores baixos em ambas as camadas o que justificam os baixos valores de susceptibilidade magnética observados no presente estudo (Figura 10). Além disso, ressalta-se que há uma variabilidade dos teores de ferro na área e entre as profundidades, na camada de 0–10 cm de profundidade os valores variaram entre 1,25–2,58 % e na camada de 20–30 cm de profundidade os valores variaram entre 1,28–2,59 % (Figura 9).

Figura 9. Teor de ferro total em amostras de um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, textura areia / areia-franca em doze pontos amostrais, nas camadas de 0–10 cm e 20–30 cm de profundidade.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Em ambiente oxidado, o ferro está na forma de Fe^{3+} estrutural sendo mais estável e com menor mobilidade, mas a variabilidade existente (Figura 9) pode ser devido ao ferro reduzido parcialmente a Fe^{2+} estrutural em filossilicatos ou a pequenas variações deste elemento no material de origem desses solos.

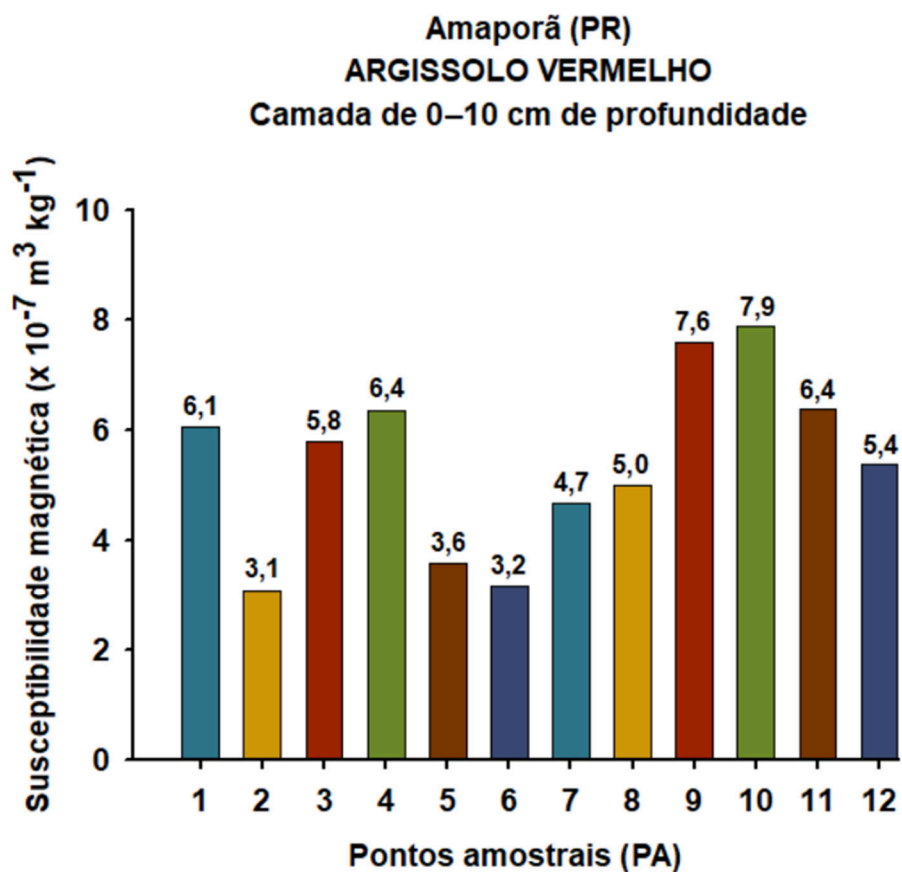
4.2 Susceptibilidade magnética por unidade de massa, camada 0–10 cm de profundidade

Os valores da susceptibilidade magnética das amostras de solo da camada de 0–10 cm de profundidade (Figura 10) variaram de $3,09\text{--}7,89 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ com média aritmética de $5,42 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e desvio padrão de $1,59 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ foram considerados extremamente baixos, evidenciando que a composição da rocha não apresenta resposta magnética provavelmente em virtude do predomínio do quartzo (SiO_2), mineral considerado diamagnético ou que não revela momento magnético quando exposto a um campo magnético externo (Costa e Bigham, 2009).

Os valores de susceptibilidade magnética obtidos no presente estudo foram inferiores aos observados por Silva et al. (2010) em amostras do horizonte B oriundas da formação Caiuá no terceiro planalto, cuja maior parte apresentou valores entre $9\text{--}22 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, sendo que os autores observaram 9 % das amostras com valores de susceptibilidade magnética entre $0\text{--}12,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$.

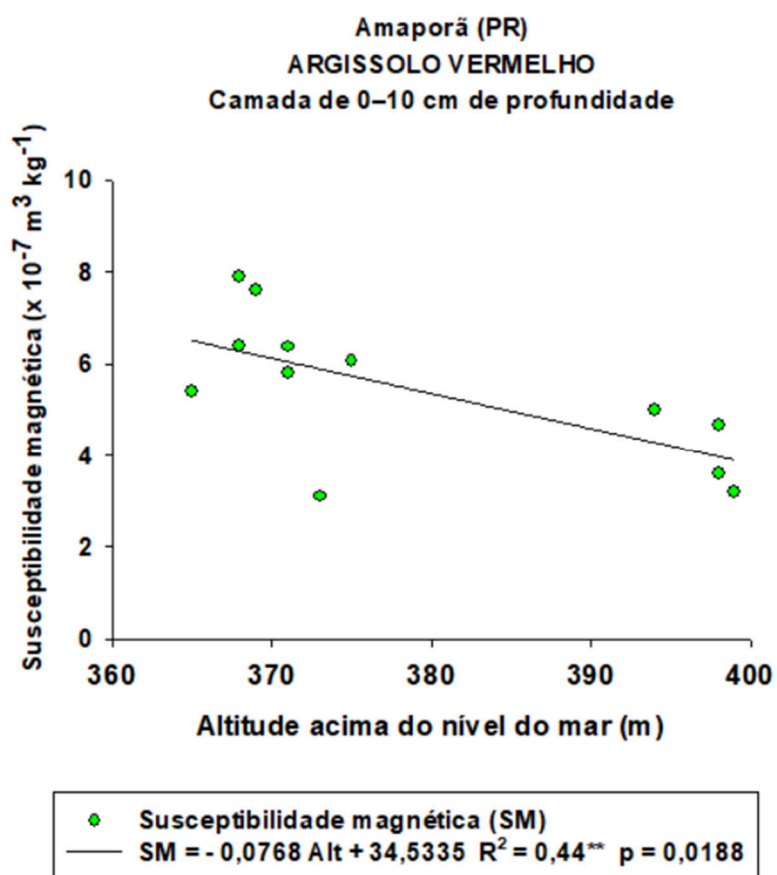
A Figura 11 demonstra a correlação entre a altitude do local de coleta das amostras e o valor da susceptibilidade magnética.

Figura 10. Susceptibilidade magnética de amostras de um ARGISSOLO VERMELHO, em doze pontos amostrais, camada de 0–10 cm de profundidade.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 11. Relação entre a suscetibilidade magnética por unidade de massa (SM) em relação à altitude de coleta das amostras de solo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4 CONCLUSÕES

O Sistema de Pastejo Intensivo irrigado (SPII) com cercas móveis contribui para a manutenção das propriedades físicas do solo.

A composição química determinada por fluorescência de raios-X e a susceptibilidade magnética das amostras de solo apresentaram variações conforme a altitude do terreno. Silício, alumínio e ferro foram os elementos químicos mais abundantes nas amostras de solo.

Os valores de susceptibilidade magnética variaram de $3,09-7,89 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ considerados extremamente baixos indicando baixa presença de minerais ferrimagnéticos nas diferentes frações do solo na camada de 0-10 cm de profundidade, indicativo da grande quantidade de quartzo presente nesses solos derivados de arenito.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, L.H.C., JACOMINE, P.T.K., SANTOS, H.G., OLIVEIRA, V.A., OLIVEIRA, J.B. Sistema brasileiro de classificação de solos, In: KER, J.C., CURTI, N., SCHAEFER, C.E.G.R., VIDAL- TORRADO, P. **Pedologia - Fundamentos**. Viçosa: SBCS, 2012, p. 303–343.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; BONETTI, J. de A. Atributos físicos do solo em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária. In: SOUZA, E. D. de; SILVA, F. D. da; ASSMANN, T. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, P. C. F.; PAULINO, H. B. **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. p. 91–106.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F. Tensões-deformações do solo induzidas pelo pisoteio animal e tráfego de máquinas em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária. In: Jorge Jamhour; Tangriani Simioni Assmann. (Org.). **I Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e IV Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil**. 1ed. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, 2017. p. 137–151.
- <https://www.bruker.com/pt/products-and-solutions/elemental-analyzers/handheld-xrf-spectrometers/TRACER-5.html>
- BARBOSA, Julierme Zimmer; POGGERE, Giovana Clarice; TEIXEIRA, Wilson Wagner Ribeiro; MOTTA, Antonio Carlos Vargas; PRIOR, Stephen A.; CURTI, Nilton. Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 192, n. 1, p. 46–56, 16 dez. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-8025-8>.
- COSTA, A. C. S. da; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. **Química e mineralogia do solo: Conceitos básicos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 506–20, 2009.
- COSTA, A. C. S. da; Souza Junior I. G.; Canton L. C.; Gil L. G.; Figueiredo R. Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), 2020;44:e0200019. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200019>
- DERPSCH, R.; ROTH, C.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft Fur Technische

Zusammenarbeit (Gtz) e Fundação Instituto Agrônômico do Paraná (Iapar), 1990. 272 p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Physical quality of sandy soils under orange orchards in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), 2022;46:e0220006. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220006>

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 229– 240.

FLINT, L. E.; FLINT, A. Porosity. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 680 – 683.

GOBBI, K. F. **Forrageiras perenes para o Estado do Paraná**. IDR-Paraná: Curitiba, 2024.

GOFF K.; SCHAEZTL R. J.; CHAKRABORTY S.; WEINDORF D. C.; KASMERCHAK C.; BETTIS E. A. III. Impact of sample preparation methods for characterizing the geochemistry of soils and sediments by portable X-ray fluorescence. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 2020;84:131–143. <https://doi.org/10.1002/saj2.20004>

GROHMANN, F.; RAIJ, B. van. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 52–53, jan./abr. 1977.

KALNICKY, D. J.; SINGHVI, R. Field portable XRF analysis of environmental samples. **Journal of hazardous materials**, v. 83, n. 1–2, p. 93–122, 2001.

MANCINI, M.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; SILVA, S. H. G.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tracing tropical soil parent material analysis via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazilian Cerrado, **Geoderma**, v. 337, 2019, Pages 718–728. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.026>.

MIYAZAWA, M.; BARBOSA, G. M. de C. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 7, p. 680–685. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000700005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/tm4XXjbcFfzL4p4fkcQYX6t/?lang=pt>. Acesso em: 7 abr. 2025.

MUZILLI, O.; LAURENTI, A. C.; LLANILLO, R. F.; FAGUNDES, A. C.; FIDALSKI, J.; FREGONEZE, J. A.; RIBEIRO, M. de F. S.; LUGÃO, S. M. B. **Conservação do solo em sistemas de produção nas microbacias hidrográficas do arenito Caiuá, Paraná**. Londrina: IAPAR, 1990. 56 p. (IAPAR. Boletim Técnico, 33).

NACHTIGALL S. D.; MANCINI, M.; REIS R.A.; ARAÚJO, E. F.; CARNEIRO, M. A. C.; CURTI, N.; SILVA, S. H. G. 2025. Prediction of soil fertility properties in Southern Brazil via proximal sensing. **An Acad Bras Cienc** 97: e20250075. DOI 10.1590/0001-3765202520250075.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do estado do Paraná**. [recurso eletrônico]. 210 p. Londrina: Iapar, 2019.

OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C.; CALEGARI, M. R. Relação solo-relevo em sistema pedológico ARGISSOLO-NEOSSOLO Quartzarênico na região noroeste do estado do Paraná: caso de Amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 21, n. 3, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i3.1786. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1786>. Acesso em: 2 jun. 2025.

PARANÁ. Instituto Agrônomo do Paraná. Secretaria da Agricultura do Paraná (org.). **Manual Agropecuário para o Paraná**. Londrina: Fundação Instituto Agrônomo do Paraná, 1976. 387 p.

PIRES, B. S.; DIAS JUNIOR, M. de S.; ROCHA, W. W.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; CARVALHO, R. de C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v. 36, n. 2, p. 635 – 642, 2012.

QGIS.org, 2024. **QGIS Geographic Information System**. QGIS Association. <http://www.qgis.org>

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A.S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Embrapa Soja, Londrina, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).

RESENDE, Mauro; CURTI, N., REZENDE, Sérvulo Batista de; CORRÊA, Gilberto Fernandes, KER, João Carlos. 2014. **Pedologia**: Base para distinção de ambientes, 6th ed. Editora UFLA, Lavras.

RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 3, p. 245–254. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054201741300011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/hdNkqprycBmk4SrwdqQMMfN/?format=html&lang=en>. Acesso em: 7 abr. 2025.

RIBEIRO, B.T., WEINDORF, D.C., SILVA, B.M., TASSINARI, D., AMARANTE, L. C.; CURI, N.; Guilherme, L. R. G. The influence of soil moisture on oxide determination in Tropical soils via portable X-ray Fluorescence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 82, p. 632–644. 2018. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.11.0380>. Disponível em: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj2017.11.0380>. Acesso em: 7 abr. 2025.

SANTOS, H. G. dos; BHERING, S. B., BOGNOLA, I. A., CURCIO, G. R.; MANZATTO, C. V., CHAGAS, C. da S.; CARVALHO JÚNIOR, W.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. da S. **Mapa de solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: Embrapa Florestas: Instituto Agrônômico do Paraná, 2008. 74 p.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5 ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/36491462/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos-ganha-versao-eletronica-gratuita>.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T. da; SILVA, J. M. F. da; ROSS, J. L. S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 7, n.2, p. 3–12, 2006. DOI: 10.20502/rbg.v7i2.74. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/74>. Acesso em: 26 jun. 2025.

SILVA, A. P. da; IMHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 83–90, 2003.

SILVA, Alceu Rodrigues da; SOUZA JUNIOR, Ivan Granemann de; COSTA, Antonio Carlos Saraiva da. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, (MG), v. 34, n. 2, p. 329–338, abr. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000200006>.

SILVA, S.H.G., RIBEIRO, B.T., GUERRA, M. B. B., CARVALHO, H.W.P. de; LOPES, G.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, L. R. G.; RESENDE, M.; MANCINI, M.; CURI,

N.; RAFAEL, R. B. A.; CARDELLI, V.; COCCO, S.; CORTI, G.; CHAKRABORTY, S., LI, B., WEINDORF, D.C. pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. **Advances in Agronomy**, 167, 1–62. 2021. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.12.001>

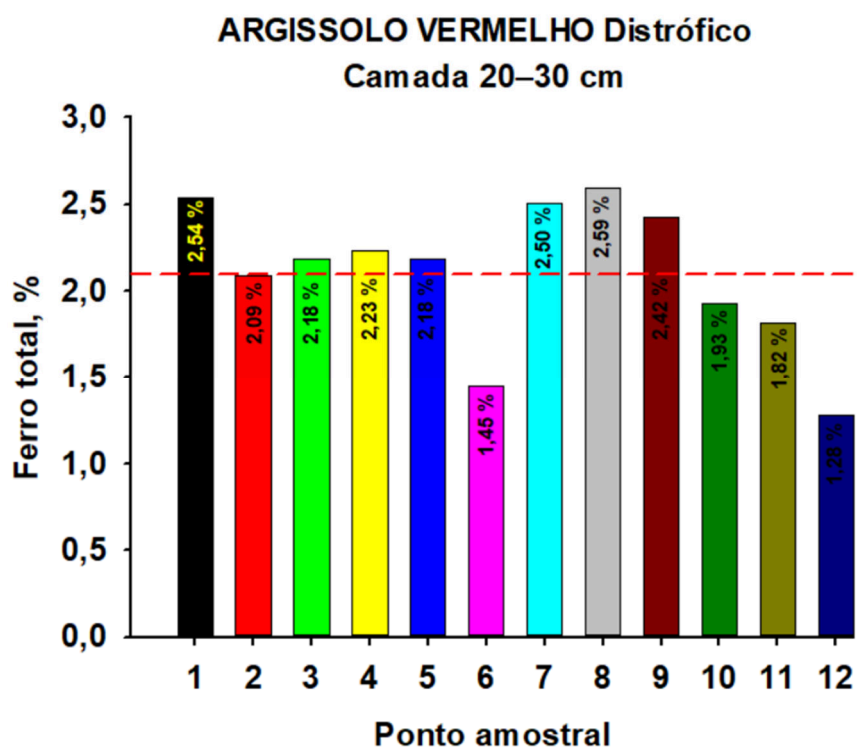
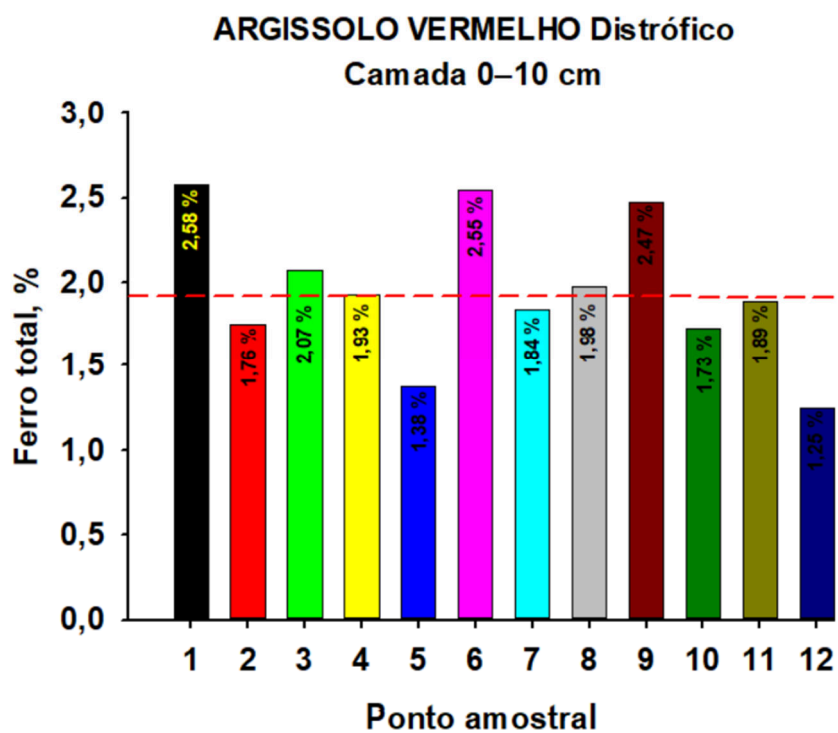
SOUZA JUNIOR, Ivan Granemann de; COSTA, Antonio Carlos Sariva; VILAR, Cesar Crispim; HOEPERS, Allan. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, ed. 3, p. 513–1519, mar. 2010.

SOUZA, A. C. B. de; LEÃO, T. P.; FIGUEIREDO, C. C. de; SÁ, M. A. C. de. Soil physical quality using DRES and VESS visual assessment approaches and physical properties. **Soil and Tillage Research**, Volume 251, 2025, 106558. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106558>.

THOMAZ, E. L.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; VENDRAME, P. R.; MELO, T. R. de. Mechanisms of aggregate breakdown in (sub) tropical soils: Effects of the hierarchical resistance. **Catena**, Amsterdam, v. 216, ep. 106377, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106377>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816222003630>. Acesso em: 7 abr. 2025.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1 de September de 1980. P. 319–344.

APÊNDICE A – Teor de ferro nas amostras de solo



ANEXO A – Distribuição do teor de ferro do solo

