

Mapeamento das propriedades físicas de solos com diferentes coberturas vegetais

Mapping of physical properties of soils with different plant coverings

Gabriel Ferreira da Silva^{1*}, Ilca Puertas de Freitas e Silva¹, Josué Ferreira Silva Junior¹, Lucas Silva da Rocha¹, Ryan Farias Luiz¹

Citação: Silva, G. F. da, Freitas e Silva, I. P. de, Silva Junior, J. F., Rocha, L. S. da, & Luiz, R. F. (2026). Mapeamento das propriedades físicas de solos com diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, v.11, p.e026004. DOI:<https://doi.org/10.18554/rbcti.v11i00.8069>

Recebido: 08 nov. 2024

Aceito: 28 dez. 2025

Publicado: 20 jul.2026



Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



1. Universidade Federal do Triângulo Mineiro , Instituto de Ciências Agrárias, Exatas e Biológicas de Iturama, Iturama (MG), Brasil.

*Autor correspondente: gabriel.ferreirautm@gmail.com

Resumo: O mapeamento de solos por meio da agricultura de precisão constitui uma ferramenta estratégica para a sustentabilidade dos sistemas produtivos agropecuários. O objetivo deste estudo foi caracterizar atributos físicos do solo em diferentes áreas e associá-los a técnicas de agricultura de precisão para subsidiar a tomada de decisão no manejo. O experimento foi realizado na Fazenda Escola “Alípio Soares Barbosa”, em Iturama, MG, com amostragens em áreas de vegetação nativa, seringueira e cultivo anual de milho, nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm. Avaliaram-se densidade do solo, porosidade total, micro e macroporosidade e resistência à penetração. A vegetação nativa apresentou menor resistência à penetração, enquanto as áreas cultivadas exibiram maior variabilidade espacial e indícios de compactação. Os mapas temáticos evidenciaram padrões espaciais distintos dos atributos físicos. Conclui-se que a agricultura de precisão permite detalhar a variabilidade do solo e orientar práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Agricultura De Precisão. Solo. Atributos Físicos. Mapas Temáticos.

Abstract: Soil mapping using precision agriculture is a strategic tool for improving the sustainability of agricultural production systems. This study aimed to characterize soil physical attributes in different areas and associate them with precision agriculture techniques to support soil management decision-making. The experiment was conducted at the “Alípio Soares Barbosa” Teaching Farm, in Iturama, Minas Gerais, Brazil, with soil sampling in areas of native vegetation, rubber tree plantation, and annual maize cultivation, at depths of 0–20 cm and 20–40 cm. Soil bulk density, total porosity, micro- and macroporosity, and penetration resistance were evaluated. Native vegetation showed lower penetration resistance, whereas cultivated areas exhibited greater spatial variability and indications of soil compaction. Thematic maps highlighted distinct spatial patterns of soil physical attributes. It is concluded that precision agriculture enables detailed assessment of soil spatial variability and supports more efficient and sustainable soil management practices.

Keywords: Precision Agriculture. Soil. Physical Attributes. Thematic Maps.

1. Introdução

Os avanços tecnológicos na agricultura têm sido impulsionados pela crescente necessidade de gerir sistemas produtivos caracterizados por elevada variabilidade espacial e temporal, visando maior eficiência econômica e sustentabilidade ambiental (Ynamassu & Bernardi, 2016). Nesse contexto, a Agricultura de Precisão (AP) consolida-se como uma abordagem estratégica de gestão agrícola, fundamentada na coleta, análise e interpretação de dados espaciais para subsidiar a tomada de decisões, possibilitando intervenções localizadas que reduzem custos, otimizam o uso de insumos e maximizam a eficiência produtiva (Hauschild, 2013; Bassoi et al., 2019).

A aplicação dos princípios da AP está diretamente associada à compreensão da variabilidade dos atributos do solo, especialmente das propriedades físicas, as quais exercem papel determinante no desempenho das culturas, na rentabilidade agrícola e na sustentabilidade dos sistemas produtivos (Resende et al., 2012). O solo é definido como um corpo natural dinâmico, constituído por fases sólida, líquida e gasosa, resultante de processos de intemperismo físico, químico e biológico sobre materiais minerais e orgânicos, influenciado por fatores climáticos, biológicos e topográficos ao longo do tempo (Santos et al., 2018). Como sistema trifásico heterogêneo, o solo condiciona diretamente o crescimento radicular, a infiltração e retenção de água, as trocas gasosas e a ciclagem de nutrientes, elementos essenciais à produtividade agrícola (Collares et al., 2006; Reichert et al., 2003).

As propriedades físicas do solo, como densidade, porosidade total, macro e microporosidade, textura e resistência à penetração, são amplamente reconhecidas como indicadores de qualidade física do solo, por influenciarem o desenvolvimento radicular, a disponibilidade hídrica, a aeração e a atividade biológica (Doran & Parkin, 1996; Tormena et al., 1998). Diferentes sistemas de manejo podem alterar significativamente essas propriedades, especialmente quando realizados de forma inadequada ou repetitiva na mesma profundidade, favorecendo a compactação, a redução da porosidade e a formação de camadas restritivas ao crescimento das raízes (Donagemma et al., 2007).

Nesse cenário, a resistência do solo à penetração (RP) destaca-se como um dos principais indicadores de compactação, sendo amplamente utilizada em estudos de manejo e qualidade física do solo, com valores críticos frequentemente associados a limitações ao crescimento radicular acima de 2000 kPa (Bengough & Mullins, 1990; Reichert et al., 2003). A utilização desse atributo em conjunto com técnicas da agricultura de precisão permite a realização de amostragens georreferenciadas em larga escala, possibilitando a identificação de padrões espaciais e a definição de zonas de manejo específicas (Hauschild, 2013).

O georreferenciamento e a confecção de mapas temáticos constituem ferramentas essenciais da agricultura de precisão, pois permitem organizar bancos de dados espaciais e representar graficamente a variabilidade dos atributos físicos do solo em uma determinada área (Ribeiro Júnior, 1995). A partir desses mapas, torna-se possível interpretar de forma mais detalhada as características do solo, direcionando intervenções apenas nos locais onde há necessidade, o que contribui para a racionalização do uso de insumos, a otimização das operações mecanizadas e a melhoria do ambiente de produção (Santos et al., 2020).

Dessa forma, a integração entre agricultura de precisão, avaliação das propriedades físicas do solo e técnicas de georreferenciamento permite ao produtor e ao gestor agrícola compreender que o solo não apresenta composição uniforme, tornando imprescindível o manejo localizado e sustentável. Diante da crescente demanda por informações científicas aplicadas à AP, este estudo tem como objetivo caracterizar as propriedades físicas do solo sob diferentes coberturas vegetais, utilizando a agricultura de precisão como ferramenta para a geração de mapas temáticos, subsidiando a tomada de decisões assertivas no manejo físico do solo.

2. Métodos

O experimento foi conduzido na Fazenda Escola “Alípio Soares Barbosa”, localizada no município de Iturama, Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas 19°43'41,2" de latitude sul e 50°13'59,9" de longitude oeste, a uma altitude média de 453 m. A área experimental encontra-se inserida em um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical quente e subúmido (Aw), caracterizado por estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação média anual de 1.378 mm e temperatura média anual de 24,7 °C, sob vegetação predominante de Cerrado.

O delineamento experimental foi estruturado em três áreas amostrais distintas, representativas de diferentes usos e coberturas do solo: área de vegetação nativa, área sob cultivo anual (milho) e área com cultivo perene de seringueira. Em cada área, foram estabelecidas parcelas experimentais com dimensões de 5 × 5 m, nas quais as amostragens de solo foram realizadas na região central, minimizando efeitos de bordadura. As coletas ocorreram em duas camadas de solo, correspondentes às profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm, permitindo a avaliação do efeito do manejo e do uso do solo ao longo do perfil.

A caracterização física do solo foi realizada a partir de amostras indeformadas, coletadas pelo método do anel volumétrico, conforme metodologia preconizada pela Embrapa (2011). As variáveis analisadas incluíram densidade do solo e porosidade total, determinadas a partir da relação entre massa seca e volume do anel. A microporosidade foi obtida por meio da mesa de tensão, utilizando coluna de água de 60 cm, enquanto a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada em campo por meio de um penetrômetro eletrônico digital, adotando-se como valor crítico o limite de 2000 kPa, conforme critérios estabelecidos pela Embrapa (2011).

As amostragens foram realizadas em período único, garantindo a padronização das condições de umidade do solo e das variáveis climáticas, de modo a reduzir interferências nos resultados, especialmente nas leituras de resistência à penetração. Adicionalmente, o histórico de manejo das áreas cultivadas, incluindo preparo do solo e tratamentos culturais, foi registrado com o objetivo de assegurar a consistência e a interpretação adequada dos dados obtidos.

Os pontos amostrais foram georreferenciados em campo com o auxílio do aplicativo “Minhas Coordenadas GPS”. As coordenadas geográficas obtidas foram posteriormente convertidas para o sistema de projeção UTM, adotando-se o Datum SIRGAS 2000, garantindo compatibilidade espacial e precisão no processamento dos dados geográficos.

A geração dos mapas temáticos dos atributos físicos do solo foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento no software QGIS, versão 3.26. Inicialmente, os dados pontuais foram organizados em camadas vetoriais, associando-se os valores dos atributos físicos às respectivas coordenadas geográficas. Em seguida, procedeu-se à interpolação espacial utilizando o método da Rede Irregular Triangular (Triangulated Irregular Network – TIN), o qual permite a construção de um modelo contínuo de variação espacial a partir da triangulação de pontos vizinhos mais próximos, formando uma rede de triângulos não sobrepostos com elevada densidade de informações.

O método TIN possibilita representar de forma eficiente superfícies com variação espacial heterogênea, sendo particularmente adequado para áreas com distribuição irregular de pontos amostrais. Durante o processo de interpolação, os parâmetros do modelo foram ajustados conforme a distribuição dos dados, resultando na geração de camadas raster contínuas representativas da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. As superfícies interpoladas foram posteriormente classificadas em classes temáticas, com base em intervalos definidos a partir de critérios técnicos e da literatura, permitindo a visualização e interpretação dos padrões espaciais.

A análise das zonas de manejo foi realizada por meio do plugin “Estatísticas Zonais” do QGIS, que possibilita a extração de estatísticas descritivas dos valores dos pixels das camadas raster, a partir de uma camada vetorial poligonal. Foram obtidos parâmetros como contagem, soma, média, mediana, desvio-padrão, valores mínimo e máximo, amplitude, bem como classes de predominância, fornecendo subsídios quantitativos para a interpretação da variabilidade espacial e a identificação de áreas com maior necessidade de intervenção no manejo do solo.

Todo o processamento dos dados espaciais, incluindo interpolação, ajuste dos modelos, classificação temática, visualização cartográfica e confecção dos mapas finais, foi realizado no ambiente do QGIS 3.26, assegurando reprodutibilidade, consistência espacial e qualidade na representação dos atributos físicos do solo.

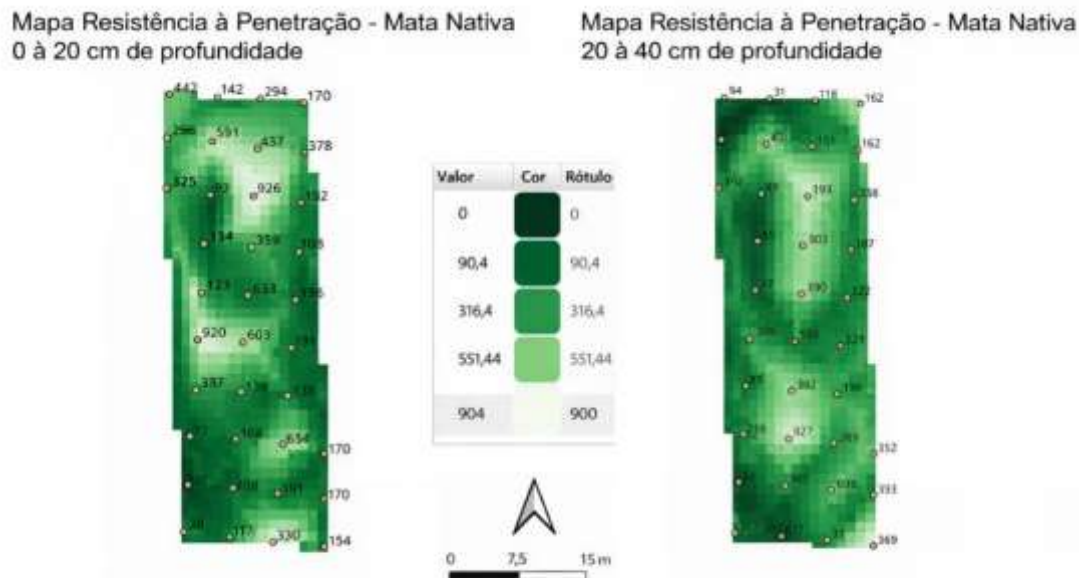
3. Resultados e Discussão

A partir das leituras de resistência à penetração obtidas com o penetrômetro eletrônico digital e dos resultados das análises físicas do solo, os dados foram organizados e utilizados para a elaboração das tabelas descritivas e dos mapas temáticos. A análise integrada dos mapas de resistência à penetração e das tabelas dos atributos físicos do solo evidenciou elevada variabilidade espacial entre as áreas avaliadas, bem como diferenças expressivas entre as duas profundidades analisadas, comportamento amplamente reportado em estudos recentes sobre variabilidade espacial de atributos físicos do solo em sistemas agrícolas (Franco et al., 2022).

Na área sob vegetação nativa, os valores de resistência à penetração na camada de 0–20 cm (Figura 1) variaram entre 0 e 900 kPa, mantendo-se abaixo do limite crítico de 2000 kPa, considerado restritivo ao crescimento radicular. Na camada de 20–40 cm, observou-se redução ainda mais acentuada desses valores, variando entre 0 e 488 kPa, indicando condições físicas favoráveis ao aprofundamento do sistema radicular. Esses resultados refletem a elevada qualidade estrutural do solo em condições naturais, associada à maior estabilidade de agregados, elevada atividade biológica e ausência de tráfego mecanizado. Estudos recentes confirmam que solos sob vegetação natural apresentam menores valores de resistência à penetração e maior funcionalidade física, caracterizando ambientes com baixa compactação e elevada sustentabilidade estrutural (Shaheb et al., 2021). Conforme destacado por Reichert *et al.* (2003), essas condições dispensam intervenções mecânicas de descompactação, como escarificação ou subsolagem.

Figura 1

Representação do mapa de resistência à penetração na área de mata nativa na profundidade de 0 à 20cm e 20 à 40cm.



Fonte: Autoria própria

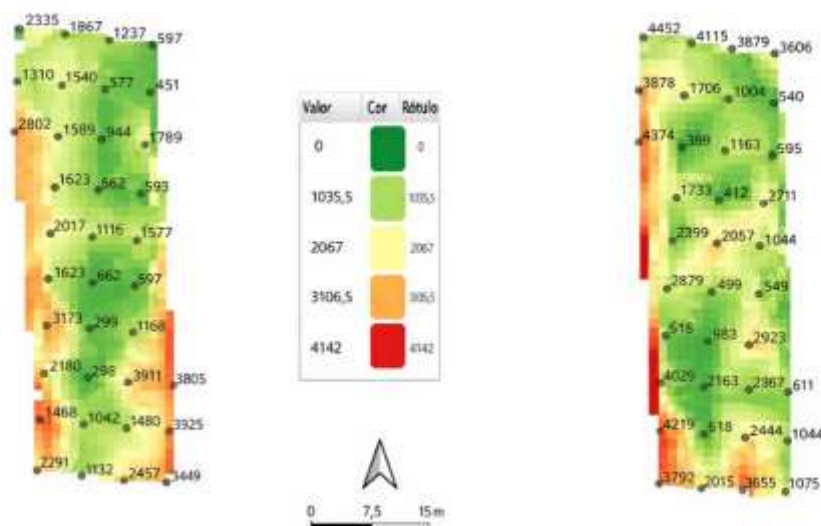
Na área cultivada com seringueira, verificou-se maior heterogeneidade nos valores de resistência à penetração, com ocorrência pontual de valores superiores ao limite crítico de 2000 kPa em ambas as camadas avaliadas (Figura 2), indicando compactação localizada do solo. Essa variabilidade espacial é típica de sistemas perenes submetidos ao tráfego recorrente de máquinas e operações concentradas em faixas específicas da área. A compactação compromete a infiltração de água, a aeração do solo e o crescimento radicular, justificando a recomendação de manejo físico localizado, como a escarificação na entrelinha da cultura, estratégia amplamente indicada para mitigar a compactação sem promover revolvimento excessivo do solo (Silva et al., 2010; Shaheb et al., 2021).

Figura 2

Representação do mapa de resistência à penetração na área de seringueira na profundidade de 0 à 20cm e 20 à 40cm.

Mapa de Resistência à Penetração - Seringueira
0 à 20cm de profundidade

Mapa Resistência à Penetração - Seringueira
20 à 40cm de profundidade

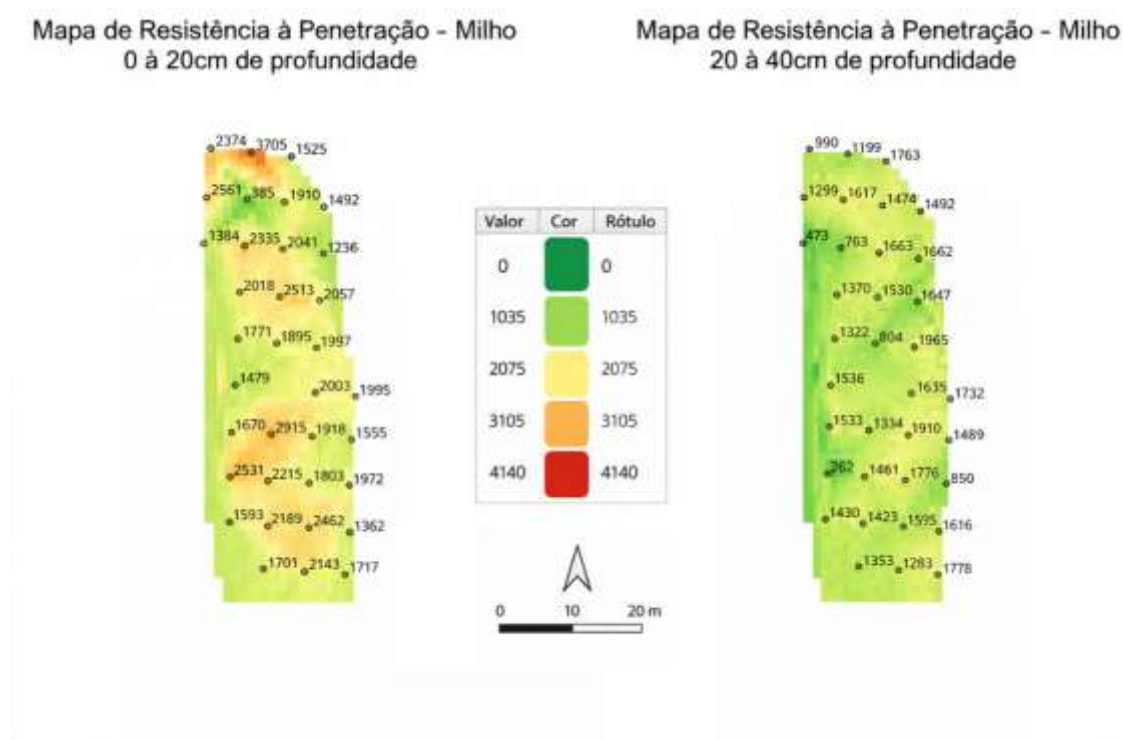


Fonte: Autoria própria

Na área sob cultivo anual, observou-se comportamento distinto em relação às demais áreas, com maior intensidade de compactação na camada superficial. Na profundidade de 0–20 cm, foram identificados 13 pontos com valores de resistência à penetração superiores ao limite crítico, indicando restrição ao desenvolvimento radicular da cultura (Figura 3). Na camada de 20–40 cm, predominou a ocorrência de valores próximos ao limite crítico, caracterizando compactação moderada. Esse padrão é típico de áreas submetidas a preparo periódico do solo, tráfego inadequado de máquinas e operações repetidas na mesma profundidade, favorecendo a formação de camadas compactadas superficiais, conforme relatado por Arshad *et al.* (1996) e corroborado por estudos mais recentes de mapeamento de compactação em agricultura de precisão (Janbazialamdari et al., 2025; Bento et al., 2023). Esses resultados reforçam a necessidade de adoção de práticas conservacionistas, como controle do tráfego, diversificação de culturas e uso de plantas de cobertura, visando reduzir os impactos da mecanização sobre a qualidade física do solo.

Figura 3

Representação do mapa de resistência à penetração na área de cultura anual na profundidade de 0 à 20cm e 20 à 40cm.



Fonte: Autoria própria

Em relação às propriedades físicas do solo avaliadas — densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade — a área sob vegetação nativa apresentou melhor condição estrutural (Tabela 1), evidenciada por maior macroporosidade, melhor aeração e maior capacidade de infiltração e drenagem da água. Esses resultados estão em consonância com estudos recentes que demonstram que solos sob cobertura natural apresentam estrutura mais estável, maior conectividade de poros e maior eficiência nos fluxos de água e ar no perfil do solo (Bronick & Lal, 2005; Franco et al., 2022). Conforme destacado por Amaral et al. (1998), maiores valores de macroporosidade estão diretamente associados à melhoria do desenvolvimento radicular e à maior resiliência física do solo.

As áreas de seringueira e cultivo anual apresentaram valores semelhantes entre si para os atributos físicos avaliados, com redução da macroporosidade e aumento relativo da microporosidade, indicando alterações estruturais decorrentes do manejo agrícola. A diminuição da porosidade total e da macroporosidade é amplamente associada à compactação induzida pelo uso inadequado do solo, conforme discutido por Dexter (2004) e reafirmado por revisões recentes sobre compactação e qualidade física do solo (Shaheb et al., 2021). Essa condição evidencia a importância da utilização de ferramentas da agricultura de precisão e do mapeamento temático para identificar áreas críticas e orientar intervenções localizadas, promovendo a recuperação da estrutura do solo e a sustentabilidade do sistema produtivo.

Tabela 1

Atributos físicos do solo das aéreas experimentais, nas camadas de 0 à 20 cm e 20 à 40 cm de profundidade, respectivamente.

Mata nativa	Densidade (g/cm ³)	Porosidade total (%)	Microporosidade (%)	Macroporosidade (%)
Ponto 1	1,36 e 1,44	34,95 e 33,47	28,34 e 25,34	6,82 e 8,11
Ponto 2	1,38 e 1,28	38,99 e 44,93	38,99 e 35,90	7,16 e 9,02
Ponto 3	1,33 e 1,28	37,80 e 38,11	30,07 e 30,13	7,72 e 7,98
Ponto 4	1,39 e 1,44	32,06 e 32,35	25,75 e 23,57	6,84 e 9,85
Seringueira				
Ponto 1	1,27 e 1,33	44,86 e 43,41	37,78 e 37,34	7,08 e 6,07
Ponto 2	1,44 e 1,28	37,72 e 42,92	30,68 e 33,85	7,04 e 6,53
Ponto 3	1,55 e 1,44	37,67 e 31,96	32,86 e 24,59	4,81 e 7,34
Ponto 4	1,39 e 1,45	32,49 e 38,05	26,77 e 30,71	5,71 e 7,34
Milho				
Ponto 1	1,34 e 1,39	42,93 e 38,76	36,20 e 32,07	6,72 e 6,68
Ponto 2	1,39 e 1,34	43,41 e 48,81	36,61 e 42,99	6,80 e 5,81
Ponto 3	1,44 e 1,50	37,51 e 37,33	24,38 e 31,67	7,11 e 4,99
Ponto 4	1,50 e 1,45	32,25 e 36,97	25,45 e 31,09	5,78 e 5,87

Fonte: Autoria própria

A caracterização dos atributos físicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, aliada ao uso de técnicas de agricultura de precisão, permitiu evidenciar de forma clara a variabilidade espacial do solo e suas implicações para o manejo. Os mapas temáticos e a análise integrada da resistência à penetração radicular, densidade e porosidade demonstraram que áreas sob vegetação nativa apresentam melhores condições estruturais, enquanto os sistemas cultivados exibem padrões diferenciados de compactação e heterogeneidade, diretamente associados ao uso e manejo. Nesse sentido, os resultados reforçam que a agricultura de precisão constitui uma ferramenta estratégica para subsidiar a tomada de decisão no manejo físico do solo, possibilitando intervenções localizadas, tecnicamente fundamentadas e alinhadas aos princípios de eficiência produtiva e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

4. Conclusão

Com base nos mapas temáticos obtidos, evidencia-se a relevância da adoção da agricultura de precisão associada ao manejo localizado do solo, o que possibilita a realização de operações mecanizadas apenas nos pontos que efetivamente demandam intervenção. Essa abordagem contribui para maior eficiência operacional, redução de custos e mitigação de impactos sobre a estrutura do solo.

Na área de vegetação nativa, observa-se resistência à penetração relativamente uniforme e com valores inferiores ao limite crítico, caracterizando uma condição física do solo favorável ao desenvolvimento radicular. Em contrapartida, nas áreas de seringueira e de cultivo agrícola, a resistência à penetração apresenta maior variabilidade espacial e discrepância nos valores, indicando a presença de zonas com restrição física. Esses resultados evidenciam a necessidade de preparo do solo realizado de forma precisa e localizada, direcionado à correção dos pontos críticos identificados.

A análise dos atributos físicos do solo reforça que a vegetação nativa proporciona melhores condições de infiltração de água, drenagem e aeração, destacando seu papel na conservação da qualidade física do solo. Por outro lado, as áreas de seringueira e de cultivo apresentam características

semelhantes entre si, com alterações na macro e microporosidade, o que indica a necessidade de adoção de práticas de manejo específicas voltadas à melhoria da retenção hídrica e da aeração do solo.

Dessa forma, a implementação de estratégias de agricultura de precisão mostra-se essencial para o planejamento e a execução de práticas de manejo do solo de maneira localizada, permitindo a otimização das intervenções conforme as particularidades de cada área e contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo e a maximização da produtividade.

Contribuição dos autores: Gabriel Ferreira da Silva contribuiu com a concepção do estudo, instalação e condução do experimento, coleta e análise de dados, interpretação dos resultados, elaboração dos mapas temáticos e redação do manuscrito. Ilca Puertas de Freitas e Silva contribuiu para a orientação do experimento, revisão e análise do conteúdo. Josué Ferreira Silva Junior contribuiu para a interpretação dos resultados, redação e análise do manuscrito. Lucas Silva da Rocha e Ruay Farias Luiz contribuíram com a condução dos experimentos e coleta dos dados.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse relacionado a publicação deste manuscrito.

Declaração ética: Este estudo não envolveu seres humanos nem animais, portanto, não necessitou de aprovação por Comitê de Ética em Pesquisa ou no Estudo de Animais.

Financiamento: Esta pesquisa foi desenvolvida com o apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), com bolsa concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) ao autor Gabriel Ferreira da Silva, sob o registro nº 130/2022.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) pelo apoio institucional e disponibilização da infraestrutura. Agradecem, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica ao Gabriel Ferreira da Silva, por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC). Os autores também agradecem a todos os envolvidos nas atividades de campo, laboratório e elaboração dos mapas temáticos.

Referências

Amaral, E. F. do, et al. (1998). *Levantamento de solos no sistema de capacidade de uso a nível de pequena propriedade rural: o caso do PED, município de Senador Guimard, Acre*. Rio Branco: Embrapa-CPAF/AC, 1998. 46p.

Arshad, M. A., Lowery, B., & Grossman, B. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1228–1236.

Bassoi, L. H., Inamasu, R. Y., Bernardi, A. C. C., Vaz, C. M. P., Speranza, E. A., & Cruvinel, P. E. (2019). Agricultura de precisão e agricultura digital. *TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, (20), 17–36.

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>

Bento, N. L., Ferraz, G. A. S., Santana, L. S., Faria, R. O., Amorim, J. S., Silva, M. L. O., Silva, M. M. A., & Alonso, D. J. C. (2023). Soil compaction mapping by plant height and spectral responses of coffee in multispectral images obtained by remotely piloted aircraft system. *Precision Agriculture*, 25(2), 729–750. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10090-0>

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

Collares, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Kaiser, D. R. (2006). Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro em um Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(11), 1663–1674. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100013>

Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3–4), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>

Donagemma, G. K., Viana, J. H. M., & Andrade, A. G. (2007). *Propriedades físicas do solo influenciadas por sistemas de preparo e manejo: Uma revisão*. Embrapa.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In J. W. Doran & A. J. Jones (Eds.), *Methods for assessing soil quality* (pp. 25–37). Soil Science Society of America.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2011). *Manual de métodos de análise de solo* (2ª ed.). Embrapa Solos.

Franco, T. C. R., Ferraz, G. A. S., Carvalho, L. C. C., Silva, F. M., Alves, M. C., & Marin, D. B. (2022). Spatial variability of soil physical properties in longitudinal profiles. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(2), e20200411. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-376520220200411>.

Hauschild, F. E. G. (2013). *Técnicas de agricultura de precisão para definição de zonas de manejo de solo* [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal de Santa Maria.

Janbazialamdari, S., Flippo, D., Ridder, E., & Brokesh, E. (2025). Soil compaction prediction in precision agriculture using cultivator shank vibration and soil moisture data. *Agriculture*, 15(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010001>

Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Braida, J. A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, (27), 29–48.

Resende, T. M., Moraes, E. R., Franco, F. O., Arruda, E. M., Araújo, J. R., Santos, D. S., Borges, E. N., & Ribeiro, B. T. (2012). Avaliação física do solo em áreas sob diferentes usos com adição de dejetos animais no bioma Cerrado. *Bioscience Journal*, 28(1), 179–184.

Ribeiro Junior, P. J. (1995). *Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo* [Tese de doutorado]. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbrreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (5ª ed.). Embrapa Solos.

Santos, M. L., Compagnon, A. M., Neto, A. M. P., Arriel, F. H., & Cintra, P. H. M. (2020). Variabilidade espacial das propriedades físicas do solo no primeiro ano de colheita da cana-de-açúcar. *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 27667–27682. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-328>

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(1), 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00119-6>

Silva, A. P., Imhoff, S., & Kay, B. D. (2010). Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of soil water content. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.002>

Tormena, C. A., Silva, A. P., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22, 573–581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400004>

Ynamassu, R. Y., & Bernardi, A. C. C. (2016). *Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar*. Embrapa Instrumentação.