

KATHERINE MARTINEZ ESCOBAR

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE LATOSSOLOS CULTIVADOS COM CAFEIEIRO
MECANIZADO NA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA-MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Teogenes Senna de Oliveira

Coorientador: Márcio Rocha Francelino

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M385p
2022
Martinez Escobar, Katherine, 1993-
Propriedades físicas de Latossolos cultivados com cafeeiro
mecanizado na região do Alto Paranaíba-MG / Katherine
Martinez Escobar. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (95 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2022.

Referências bibliográficas: f. 84-90.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.655>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Fertilidade do solo. 2. Latossolos - Triângulo
Mineiro/Alto Paranaíba (MG : Mesorregião). 3. Cerrados.
4. Café - Cultivo - Métodos estatísticos. I. Oliveira, Teógenes
Senna de, 1961-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.422

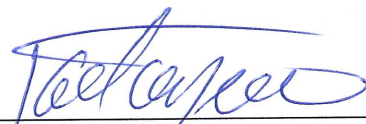
KATHERINE MARTINEZ ESCOBAR

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE LATOSSOLOS CULTIVADOS COM
CAFEIRO MECANIZADO NA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA-MG**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de março de 2022

Assentimento:



Katherine Martinez Escobar
Autora



Teógenes Senna de Oliveira
Orientador

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a minha mãe Maria Emilce pelo seu exemplo e amor genuíno, meu irmão Juan David, meu sobrinho Sergio Alejandro e minha irmã Kelly Johanna, pelo apoio, respeito, amor e doçura, pelas suas presenças na minha vida;

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de vir ao Brasil e ampliar a minha visão do mundo;

Ao Departamento de Solos da UFV, pelos conhecimentos adquiridos na área;

Ao Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos pelo espaço disponibilizado fazendo-me sentir em casa;

Ao Professor Teogenes Senna de Oliveira, pela orientação, acompanhamento e boa disposição;

Ao Laboratório de Física do Solo do DPS, por permitir-me realizar as análises e todos seus funcionários sempre prestos para ajudar;

Ao Professor Júlio Neves pela coorientação e tempo dedicado a meu projeto, sendo também a ponte entre nós e a fazenda para realizar esta pesquisa;

Ao Professor Márcio Francelino por disponibilizar equipamentos para esta pesquisa;

As pesquisadoras Laís Maria Rodrigues e Keise Bacelar, a equipe desse projeto, que estiveram comigo auxiliando em todas as etapas de sua realização;

A Rodrigo e Cristiano e toda empresa de consultoria SNP e ao sr. Geraldo, gerente da Fazenda Chuá e todas as pessoas que facilitaram e disponibilizaram as condições para desenvolver esta pesquisa em Patos de Minas-MG;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

A EMBRAPA-Café pelo financiamento do projeto;

Ao Brasil, pelas oportunidades oferecidas e pelas vivências;

A todas as pessoas maravilhosas que conheci em Viçosa e me brindaram uma mão, a tod@s,
¡MUCHAS GRACIAS!

*Treinta radios convergen en el centro de una rueda,
pero es su vacío,
lo que hace útil al carro.
Se moldea la arcilla para hacer la vasija,
pero de su vacío
depende la utilidad de la vasija.
Se horadan puertas y ventanas en los muros de una casa,
y es el vacío,
lo que permite habitarla.
Así, son las cosas físicas que parece ser lo principal,
pero su valor radica en lo metafísico.*

aforismo XI

Lao-Tse (Tao Te Ching, aproximadamente siglo VI a.e.c)

RESUMO

ESCOBAR, Katherine Martinez, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, março de 2022. **Propriedades físicas de Latossolos cultivados com cafeeiro mecanizado na região do Alto Paranaíba-MG.** Orientador: Teogenes Senna de Oliveira. Coorientador: Márcio Rocha Francelino

Os solos dos Cerrados são profundos, bem estruturados, com boas condições de drenagem, com limitações químicas e localizados em relevo plano a suave ondulado, o que favorece a mecanização para a cafeicultura. Quando há possibilidade de mecanização, otimiza-se os recursos, aumentando também a eficiência da lavoura. No entanto, o uso intensivo de máquinas agrícolas pode levar à compactação do solo, comprometendo o crescimento das raízes e o desenvolvimento da cultura. Este trabalho objetivou avaliar o efeito da mecanização sobre as características físicas de um Latossolo cultivado com cafeeiro mecanizado e irrigado na região do Alto Paranaíba-MG, aplicando ferramentas de sensoriamento remoto e geofísico de radar de penetração do solo (GPR). Oito áreas de cultivo foram selecionadas com diferentes cultivares e anos de plantio de café arábica (BV06, BA08, BV15, BA14, BV09, CT01a, AR17 e CT01b), usando como critério de seleção o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a amostragem dos atributos físicos e químicas em cinco posições de coleta, denominadas saia alta (SA), rodado alto (RA), entrelinhas (EL), rodado baixo (RB) e saia baixa (SB), nas profundidades 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m do solo. Os dados foram submetidos à análise multivariada utilizando componentes principais (PCA), e, posteriormente, os atributos selecionados foram submetidos a análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O NDVI classificou áreas nas faixas de 0,5 a 0,9, indicando variação do vigor nas plantas de café, o que foi associado a algum tipo de estresse biótico ou abiótico, sendo necessário uma validação em campo para a correta identificação e diagnóstico. A PCA selecionou até três componentes principais (CP1, CP2 e CP3) compostos por 12 atributos físicos e químicas dentre um total de 27. Os atributos porosidade total (PT), resistência à penetração média (RPmed) e máxima (RPmax), umidade em volume (θ) na tensão de 100 kPa e 300 kPa foram maiores nas profundidades 0,0-0,1m e -,1-0,2 m. O GPR não identificou diminuição da PT ou compactação em profundidade. Contudo, PT, RPmed e RPmax demonstraram a existência de compactação nas faixas dos rodados no plantio de café. A lavoura com 3,5 anos de plantio

não apresenta variação significativa na PT, RPmed e RPmax como medidas indiretas de compactação, no entanto, demonstra a tendência de ocorrência do fenômeno. O GPR não identificou mudanças dos atributos físicos em subsuperfície para Latossolos.

Palavras-chave: Subsuperfície. Compactação. Produtividade. NDVI. *Coffea arabica*.

ABSTRACT

ESCOBAR, Katherine Martinez, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, March, 2022. **Physical properties in Latosols cultivated with mechanized coffee in the region of Alto Paranaíba-MG.** Adviser: Teogenes Senna de Oliveira. Co-adviser: Marcio Rocha Francelino.

The soils of the Cerrado are deep, well-structured, with good drainage conditions, with chemical limitations, and located in flat to gently undulating relief, which favors mechanization for coffee growing. When there is the possibility of mechanization, resources are optimized, also increasing the efficiency of the crop. However, intensive use of agricultural machinery can lead to soil compaction, compromising root growth and crop development. This study aimed to evaluate the effect of mechanization on the physical characteristics of an Latosol cultivated with mechanized and irrigated coffee in the Alto Paranaíba-MG region, using remote sensing tools and the geophysical method of ground penetration radar (GPR or georadar). Eight cultivation areas were selected with different cultivars and years of planting of arabica coffee (BV06, BA08, BV15, BA14, BV09, CT01a, AR17 and CT01b) using as selection criterion the normalized difference vegetation index (NDVI) for the sampling of physical and chemical variables in five collection positions: right canopy projection (SA), right wheel (RA), interrows (EL), left wheel (RB) and left canopy projection (SB) at depths 0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3 and 0.3-0.4 m from the ground. The data were submitted to multivariate analysis using principal components (PCA), and, later, the selected variables were submitted to analysis of variance, and the means were compared using the Tukey test ($p < 0.05$). The NDVI classified areas in the ranges from 0.5 to 0.9, indicating variation in vigor in coffee plants, which can be associated with some type of biotic or abiotic stress, requiring field validation for correct identification and diagnosis.. The PCA selected three main components (CP1, CP2 and CP3) composed of 12 physical and chemical variables among a total of 27. The variables total porosity (PT), average (RPmed) and maximum penetration resistance (RPmax), soil moisture in volume (θ) at tensions of 100 kPa and 300 kPa were higher at depths 0.0-0.1m and 0.1-0.2 m. The georadar did not identify PT decrease or depth compaction. PT, RPmed and RPmax demonstrated the existence of compaction in the tracks of the wheels in coffee plantations. The crop with 3.5 years of planting does not show significant variation in PT, RPmed and RPmax as indirect measures of compaction, however, it demonstrates the tendency of occurrence of the phenomenon. The GPR method did not identify changes in subsurface physical attributes for Latosols.

Keywords: Subsurface. Compaction. Productivity. NDVI. *Coffea arabica*.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	10
2 Material e Métodos	15
2.1 Amostragem de solo	19
2.2 Radargramas pelo georradar	24
2.4 Resistência à penetração (RP) em campo	25
2.5 Análises físicas	25
3 Resultados	28
3.1 Análise de componentes principais (PCA)	28
3.2.1 Porosidade total (PT).....	36
3.2.2 Resistência à penetração média (RPmed), máxima (RPmax) e mínima (RPmin) em amostras indeformadas	38
3.2.3 Umidade em volume (θ) nas tensões de 100 kPa e 300 kPa	47
3.2.4 Teores de Areia Grossa (AG), Areia Fina (AF) e Argila (ARG)	51
3.2.5 Ca^{2+} e Mg^{2+}	54
3.2.6. Resistências à penetração média (RPmed), máxima (RPmax) e mínima (RPmin) e porcentagem de umidade do solo (U %) em campo	57
3.2.7. Descrição qualitativa dos radargramas	65
4. Discussão.....	67
4.2 Atributos físicos	69
4.3 Atributos químicos.....	76
4.4 Análises dos radargramas.....	77
4.5 Produtividade de <i>Coffea arabica L.</i> na área de estudo.....	79
5 Considerações Finais	82
6 Conclusões	82
REFERÊNCIAS	84
ANEXOS	91

1 Introdução

O café é uma das commodities de maior importância econômica para o Brasil. A área total cultivada com café arábica (*Coffea arabica* L.) e conilon (*Coffea canéfora* Pierre ex Froehner) é de 2.200 mil hectares, dos quais a área cultivada com a variedade arábica está estimada em 1.789,4 mil ha, 81,3% da área total destinada à cafeicultura nacional. Minas Gerais concentra a maior área com a cultura, 1.287,9 mil ha, correspondendo a 71,9 % da área ocupada com café arábica (*Coffea arabica*) em âmbito nacional (CONAB, 2021). Na última safra de 2021, foram produzidas cerca de 11.751,9 mil sacas no Sul de Minas, 4.919,7 mil sacas na Zona da Mata e 4.777,7 mil sacas no Cerrado Mineiro (CONAB, 2021).

O desenvolvimento da cafeicultura mineira teve início no século XIX com plantações estabelecidas nas regiões Sul e Zona da Mata (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000). Com o passar do tempo, os cafezais mineiros expandiram-se para novas áreas, como o Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Alto Jequitinhonha (EMATER, 2021), regiões de relevo mais aplainado, o que favorece a mecanização, porém com necessidade de sistemas irrigados (GOMES et al., 2020). Estas regiões somam 51 municípios e uma área cafeeira de 211,9 mil ha (EMATER, 2021). Embora sejam profundos e capazes de armazenar um grande volume de água, os solos desta região apresentam severas limitações químicas que restringem a profundidade efetiva para o desenvolvimento do sistema radicular (SILVA et al., 2019), como elevada acidez e toxidez de Al^{3+} (SILVA et al., 2003) e baixos teores de fósforo (P) e cálcio (Ca^{2+}) (LYNCH; WOJCIECHOWSKI, 2015).

Alguns fatores influenciam a produtividade do cafeeiro, tais como: a adaptação do material genético à região de cultivo (DOS SANTOS FERNANDES et al., 2020); as variações climáticas, afetando o desenvolvimento das fases fenológicas da cultura (SILVA et al., 2013); e o solo, tendo em vista a influência que exerce sobre o comportamento da água, a disponibilidade de nutrientes e o suporte ao desenvolvimento das plantas (BARETA JUNIOR, 2021). O café necessita de bons índices pluviométricos (MOAT et al., 2017) para se desenvolver e a deficiência hídrica é umas das maiores responsáveis por quebras de produção, ameaçando a sobrevivência da planta (SILVA; ALLAN, 2012).

Para o desenvolvimento de uma cafeicultura sustentável, o solo deve apresentar bons indicadores de qualidade física. Qualquer intervenção realizada no solo pode modificar sua estrutura, com consequências benéficas ou não para a produtividade. Essas interferências

podem estar diretamente relacionadas com o tipo de solo e ao manejo adotado (no caso, tipo de irrigação, tratos culturais e colheita), promovendo alterações nas propriedades físicas do solo, permanentes ou temporárias (MAIA, 2016).

Uma das etapas mais onerosas da cafeicultura é a mão de obra (CONAB, 2017), principalmente quando os tratos culturais e colheita são realizados manualmente. Neste cenário, a mecanização na cafeicultura, principalmente nos Cerrados, é justificada pela redução de custos, especialmente na colheita, tornando as lavouras mais eficientes. No entanto, o uso intensivo de máquinas e equipamentos agrícolas em condições inadequadas de umidade do solo pode levar à compactação (SILVA et al., 2002; SILVA et al., 2003; CARMO et al., 2011; SOUZA et al., 2014). As operações mecanizáveis nas lavouras cafeeiras se concentram em pequenas faixas nas estrelinhas de plantio, obrigando as máquinas a transitarem sempre no mesmo local (CORTEZ et al., 2010b), causando a compactação diferencial desse solo. Neste espaço restrito, próximo à projeção da copa do cafeeiro, é onde se concentra a maior parte de suas raízes ativas, ficando o crescimento das raízes sujeito às restrições do solo (CARMO et al., 2011a).

A dificuldade de expansão do sistema radicular tem implicações diretas e indiretas no desenvolvimento das lavouras, refletindo na queda da produtividade (FERNANDES et al., 2012), alterando a capacidade de infiltração da água, aeração, transferência de calor e movimentação de nutrientes no perfil do solo (RICHMOND; RILLO, 2006). A capacidade do solo de disponibilizar água é função das propriedades de retenção, determinadas pela qualidade da estrutura do solo, o que resulta da interação entre textura, mineralogia, matéria orgânica e das práticas de manejo (SILVA et al., 2014).

A compactação é um processo que varia conforme a textura e o tipo de manejo no solo (FERNANDES et al., 2012), e é definida como o aumento da densidade do solo como resultado das cargas ou pressões aplicadas a ele. A magnitude da compactação é expressa pelo aumento da densidade e da resistência do solo à penetração (GROSSO et al., 2020; LIMA; SILVA; RAMINELLI, 2013; LOPES et al., 2020; LUCIANO et al., 2012; RICHMOND; RILLO, 2006), podendo ser facilitada pelo regime hídrico do solo. A água funciona como um lubrificante entre as partículas minerais, proporcionando, até um determinado teor, o aumento na susceptibilidade do solo em sofrer compactação, conhecida como umidade crítica (θ_{crit}) de compactação (MARTINS et al., 2012).

Aliada à umidade do solo crítica (θ_{crit}), a textura também contribui para a propensão à compactação. Solos de textura argilosa são mais propensos à compactação que solos de textura

arenosa (NAGHDI et al., 2020), uma vez que os grânulos de areia não são passíveis de serem comprimidos, como ocorre com os agregados de argila. Para sistemas de produção cafeeira, onde a colheita e tratos culturais são realizadas mecanicamente, pode haver compactação a curto prazo, devido ao tráfego de máquinas (OLIVEIRA et al., 2010), gerando um aumento na densidade diretamente proporcional ao aumento da resistência à penetração (SÁ et al., 2016). O principal efeito das forças de compressão no solo é a mudança na porosidade, especialmente a redistribuição do tamanho dos poros. Com o aumento das forças compressivas, os poros maiores colapsam, assim, o aumento na densidade do solo implica na redução do volume dos poros, especialmente dos macroporos (RICHMOND; RILLO, 2006).

Alguns atributos atuam como indicadores, sendo sensíveis às variações no manejo, portanto, passíveis de alterações na qualidade física do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005). Esses indicadores estão relacionados com o arranjo estrutural das partículas sólidas e da porosidade, e refletem limitações ao desenvolvimento radicular, ao movimento de água no perfil e conseqüentemente, ao potencial produtivo do solo (EFFGEN et al., 2012). Dentre outros indicadores, destacam-se a densidade do solo (D_s), a porosidade total (PT), a macro (Ma) e microporosidade (Mi), a resistência à penetração (RP) e a umidade do solo (θ), os quais revelam alterações estruturais provocadas pela adoção de determinado sistema de manejo do solo, como também, problemas relacionados ao encrostamento superficial do solo e sua susceptibilidade à erosão e à compactação (LIMA et al., 2007). De forma geral, estas propriedades funcionam como indicadores de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas (TORMENA et al., 2002).

A densidade do solo (D_s) é um parâmetro físico que reflete o arranjo das partículas e, a partir desse arranjo, apresenta espaços vazios chamados de porosidade do solo, que variam com a profundidade do perfil, com a textura, a natureza, o tamanho e a forma das partículas do solo e com fatores externos e ambientais (LIMA et al., 2007). Geralmente é expresso em unidades de volume, apresentando uma relação direta com a alteração na estrutura do solo. Assim, com o aumento da compactação, maiores valores de D_s são gerados (TORMENA et al., 2002; ORTIGARA et al., 2014).

Segundo Lima et al. (2007), os poros do solo são um parâmetro variável pelos mesmos fatores apresentados na D_s . A porosidade total (PT) quantifica o volume do solo ocupado por ar e água, ou seja, o espaço do solo não ocupado por partículas sólidas e, de acordo com o diâmetro, podem ser classificadas em macro e microporos. O fluxo de gases e o movimento de água no solo estão intimamente relacionados ao volume de macroporos, portanto, para garantir

a oxigenação radicular, bem como a infiltração de água e distribuição de água no perfil, torna-se importante esse atributo (EFFGEN et al., 2012), denominado porosidade de aeração do solo. Goularte (2014) considera que a porosidade de aeração do solo abaixo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é prejudicial para a produção agrícola, mas sabe-se que existem variações nesse percentual de acordo com o tipo de solo e estágio vegetativo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

A relação inversamente proporcional da PT com a Ds e a RP estabelece que valores de Ds maiores no solo, tendem a corresponder com valores menores de PT, podendo ser um indício de zonas compactadas, com maior resistência à penetração (LIMA; SILVA; RAMINELLI, 2013). Pereira et al. (2010) estudaram, por componentes principais, atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico e determinaram alta correlação negativa entre Ds e valores de PT e Ma, denominando este efeito de degradação estrutural do solo, resultando nos primeiros indícios de compactação. Em relação à microporosidade, Tormena et al. (2002) encontraram uma interação inversa entre Mi e PT e Ds. O primeiro aumento na Ds veio da diminuição do espaço poroso referente aos macroporos, uma vez que, devido ao tamanho dos poros, são os primeiros a sofrerem os efeitos das tensões aplicadas em superfície. Assim os Ma tornam-se cada vez menores, até atingirem os diâmetros dos microporos, levando a um aumento inicial de Mi com o consequente aumento da Ds. Resultados similares foram obtidos por Effgen et al. (2012) em lavouras de cafeeiro na camada superficial do solo (0,00-0,20 m) e em sistema de café com manejo mecanizado. Carmo et al. (2011) mostraram menores valores de macroporosidade, menor relação Ma/Mi e aumento nos valores de microporosidade, na profundidade de 0,0 – 0,03 m, quatro anos após o plantio.

A resistência à penetração (RP) responde aos efeitos da densidade e umidade, sendo considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação, porém apresenta alto coeficiente de variação e elevada correlação negativa com a umidade do solo (SILVEIRA et al., 2010). Tormena et al. (2002) mostraram uma tendência de redução da RP em profundidade devido a maior umidade em determinadas épocas do ano na subsuperfície, comparativamente à superfície do solo, sendo esta última mais afetada pela perda de água via evaporação e evapotranspiração, que levam secamento do solo em superfície. Medina et al. (2012) afirmam que a RP é uma medida indireta da força exigida pelas raízes para penetrar nos poros ou canais existentes no solo, ou para deformar a estrutura do solo e avançar no meio poroso a fim de fornecer suporte, absorver nutrientes e água para o devido desenvolvimento de safras.

Em solos compactados, os volumes de água serão menores devido à queda nos valores de porosidade (SILVA, 2014). A umidade do solo é um dos fatores que controlam a condutividade elétrica no solo (MELO, 2020; MELO et al., 2021) e, uma possível correlação entre o grau de compactação do solo e sua condutividade elétrica, poderia constituir uma forma de aplicação de métodos de sensoriamento não invasivos baseados na ação de um campo magnético ou elétrico no solo (RODRÍGUEZ; RODRÍGUEZ; PÉREZ, 2011).

Novos métodos como o radar de penetração do solo (GPR ou Georradar) surgem como alternativas para análises mais representativas da condição de uso do solo, além de uma amostragem mais ampla, embora possam produzir resultados que precisam ser correlacionados com avaliações laboratoriais convencionais. A facilidade de gerar grande quantidade de dados de forma simples e menos trabalhosa *in loco* torna a metodologia atrativa (ROSSEL, 2013). Embora técnicas geofísicas indiretas possam ser utilizadas para estudar o solo na subsuperfície, principalmente para descrever atributos físicos, essas ainda são pouco utilizadas para esse fim (FRANCELINO et al., 2011).

O georradar (GPR) é um método geofísico não invasivo considerado como uma possível ferramenta no auxílio do estudo dos solos em subsuperfície (CEZAR et al., 2010). A sua grande vantagem é a aplicabilidade sob a maioria das condições de campo, com medições rápidas que permitem explorar grandes áreas, em escalas de dezenas de metros até quilômetros. O equipamento utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, e reflete mudanças nas propriedades dielétricas (SEGER; NASHAIT, 2011).

As ondas do GPR se propagam pelo solo e o tempo de propagação depende das propriedades dielétricas dos materiais (RIBEIRO, 2013). Como o solo é composto por diferentes fases (sólida, líquida e gasosa), a permissividade dielétrica de um solo é determinada pelas características e proporções de cada uma dessas fases. Salat e Junge (2010) mostraram uma correlação linear entre permissividade dielétrica e massa seca e densidade de um solo, indicando que a permissividade de solos secos depende fortemente de sua porosidade e compactação, uma vez que a compactação do solo diminui a porosidade e, portanto, a proporção de gases, nesse sentido, a constante dielétrica e a permissividade aumentam (SALAT; JUNGE, 2010). Camadas compactadas por máquinas agrícolas foram detectadas utilizando georradar por André et al. (2012) em solos classificados em três categorias principais de acordo com a textura, areia sobre argila, solo pedregoso-arenoso e solo arenoso com pseudogley,

denominados, respectivamente, de Planossol, Peyrosol e Redoxisol ou Reductisol, segundo a classificação francesa (BAIZE & GIRARD, 1998).

A partir do exposto, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a resposta da estrutura de um Latossolo, cultivado com cafeeiro mecanizado e irrigado na região do Alto Paranaíba-MG, utilizando indicadores de qualidade física do solo.

2 Material e Métodos

Doze propriedades produtoras de café foram selecionadas na área de estudo da macrorregião do Alto Paranaíba - MG, considerando diferentes formas de manejo envolvendo irrigação (gotejamento ou aspersão por pivot central), intensidade de uso de mecanização, variedades da cultura, produção e produtividade, todas a partir de consultas a técnicos da região. Para a delimitação das propriedades e das áreas de cultivo foram utilizadas informações do Cadastro Ambiental Rural (CAR) (disponível em <https://www.car.gov.br/publico/municipios/downloads>). Para estas áreas, calculou-se mapas com índices espectrais a partir de imagens satelitais, testando-se: Índice de Água por Diferença Normalizada - NDWI (*Normalized Difference Water Index*); Índice de Estresse de Umidade - MSI (*Moisture Stress Index*); e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), visando identificar indícios de restrições no solo para o cafeeiro. Dos índices calculados, o NDVI apresentou melhor resposta, relacionado com o vigor das plantas, sendo este influenciado pelas diferentes interações solo-planta (LADEIA et al., 2019). A variabilidade resulta em mudanças na refletância das plantas pela alteração do vigor como resposta à influência biótica e/ou abiótica, o que é possível associar com algum tipo de restrição para o cafeeiro.

Os valores do NDVI podem oscilar entre -1 e 1 e, quanto mais próximos de 1, maior a densidade de cobertura vegetal e, quando os valores são negativos (-1), estes se associam à presença de corpos de água. Valores que se aproximam de 0 (zero) representam ausência de vegetação e solo exposto (MOTA, 2020). A diversidade espacial de planta e solo resulta em diferentes respostas espectrais (refletância), as quais podem não estar associadas apenas ao estado nutricional da planta, mas também podem ser decorrentes de estresses bióticos e/ou abióticos (ALVES LADEIA et al., 2019). Assim, para se ter informações do desenvolvimento vegetativo do café (vigor) das 12 fazendas, foram calculados os NDVIs, identificando-se áreas

com índices dentre 0,5 e 1, considerando que os valores mais próximos de 0,5 representam plantas de café com baixo vigor, o que pode ser uma resposta fisiológica a algum tipo de restrição.

As imagens multiespectrais utilizadas foram obtidas pela Agência Espacial Europeia (ESA), missão Sentinel-2 através da plataforma Copernicus Open Access Hub. Estas imagens foram importadas e processadas no software QGIS Desktop 3.12.0, utilizando-se as bandas da região do vermelho (Red) e infravermelho próximo (NIR), correspondentes às bandas 4 e 8, com comprimento de onda de 650 a 680 e 785 a 900 nm, respectivamente, e resolução espacial de 10 m, nível 2A, ortorretificadas com níveis de reflectância abaixo da atmosfera - BOA (Bottom Of Atmosphere), referentes ao dia 14/05/2021. Esta data foi escolhida por não haver precipitação há pelo menos 30 dias e também pelo café estar em pré-colheita, ou seja, já no final do amadurecimento dos grãos, quando as plantas já não são mais irrigadas. Mesmo assim, as precipitações abaixo das séries históricas no ano agrícola 2020/2021, levaram as fazendas manterem as áreas irrigadas para atender a necessidade de sobrevivência das plantas, ou seja, umidade do solo acima do ponto de murcha permanente (PMP), viabilizando a sobrevivência das plantas. Mesmo assim, a condição permitiu a identificação de variações nas imagens que refletissem a resposta ao estresse pela cobertura vegetal

O cálculo do NDVI foi realizado pela diferença de refletância entre a faixa NIR e a de Red dividida pela soma das faixas NIR e Red de acordo com a equação (1) proposta por (ROUSE et al., 1973).

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (1)$$

em que: NIR é a faixa de onda do infravermelho próximo e Red a faixa do vermelho.

A segunda etapa foi a avaliação do NDVI em campo. Nas 12 fazendas analisadas foram identificadas áreas de cultivo com valores do NDVI (em torno de 0,5) que expressavam potenciais restrições em subsolo, algumas descartadas pela/devido a pouca variabilidade do NDVI's entre áreas de cultivo, ou, então, pelo simples fato destas áreas estarem em renovação de plantios. A partir da pré-seleção, cinco fazendas foram visitadas para a validação em campo e algumas foram descartadas pelo corpo técnico das fazendas, pois existia uma associação das áreas de cultivos a situações de renovação de plantio, como esqueletamento de lavoura, podas, plantio recente, ou ataque de pragas como o bicho mineiro (*Leucoptera coffeella* -Guérin-

Méneville, 1842) ou a presença de plantas invasoras (corda de viola *Ipomoea sp. L.*). A fazenda Chuá foi selecionada por apresentar a maior variabilidade dos NDVIs dentro de sua área em relação às demais fazendas e seu potencial de associação com as restrições de subsolo (Figura 1). Esta fazenda encontra-se localizada no município de Patos de Minas- MG, cuja sede apresenta as coordenadas 18°35'24" S e 46°25'48" W. A altitude média da propriedade é de 1.046 metros, localizada em relevo plano a suave-ondulado (SILVA; FARIA; REIS, 2003b).

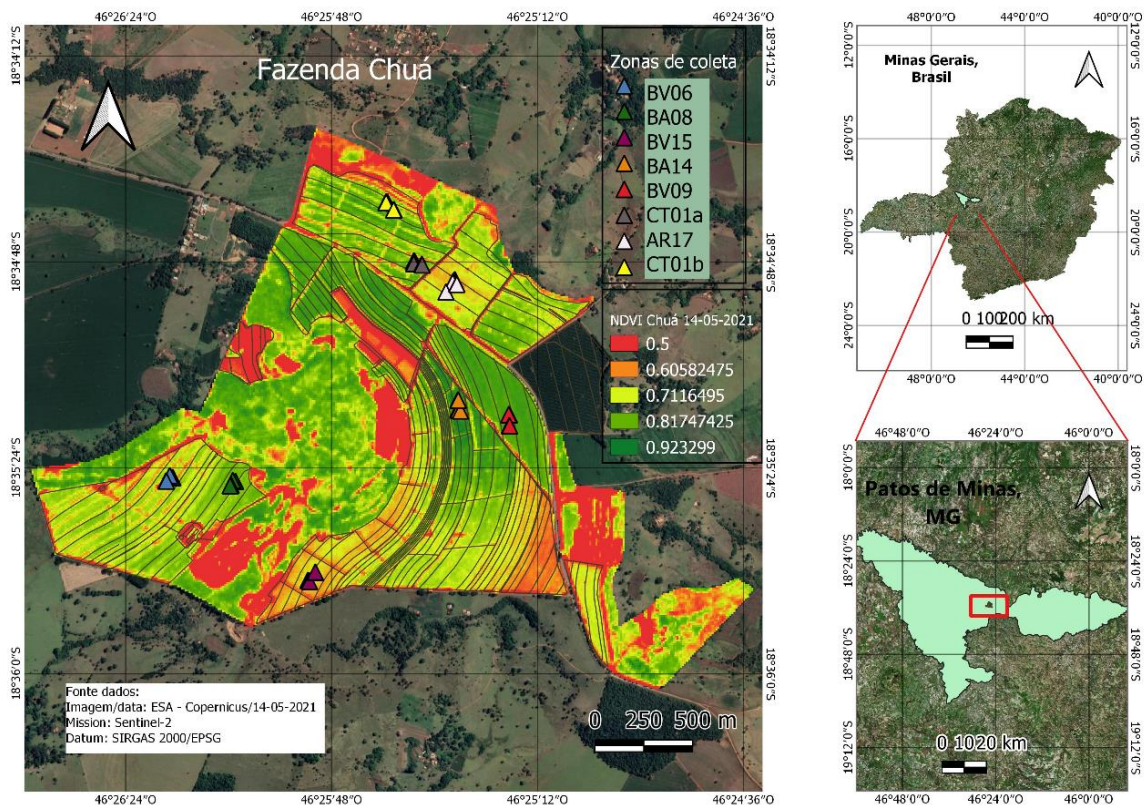


Figura 1. Localização da Fazenda Chuá, delimitação e distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das áreas de cultivo, Patos de Minas-MG.

O clima, de acordo com o sistema de classificação de Köppen, é do tipo Cwa, sendo subtropical úmido com inverno seco e verão quente com precipitação anual em torno de 1.448 mm. As precipitações concentram-se nos meses de outubro a março e a temperatura média anual é de 20,4 °C (ALVARES et al., 2013). O solo predominante na área é Latossolo Vermelho-Amarelo. Na fazenda predominam solos de textura muito argilosa (teor de argila > 60%) (Tabela 2), naturalmente ácidos (pH entre 4,3 e 6,0) e distróficos (V<50%). As áreas de café são irrigadas por gotejamento, sendo totalmente mecanizadas, e conduzidas para obtenção de alta produtividade do cafeeiro, conforme as recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes de Guimarães et al. (1999) (Tabela 1).

Tabela 1 - Variedades de *Coffea arabica*, espaçamento, ano de plantio, área de cultivo e produtividade em diferentes cultivares da Fazenda Chuá, Patos de Minas – MG

Área de cultivo	Variedade/ cultivar	Espaçamento (m)	Ano de plantio	Área	Produtividade (sc ha ⁻¹)				
					2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018	2016/2017
BV06	Bourbon Vermelho	4,00 x 0,70	2006	30,48	20,90	61	1	55	3
BA08	Bourbon Amarelo	4,00 x 0,70	2008	18,38	4,63	63	5	50	11
BV15	Bourbon Vermelho	4,00 x 0,70	2015	22,92	42,29	41	50	41	2
BA14	Bourbon Amarelo	4,00 x 0,70	2014	15,4	82,56	esq	67	50	74
BV09	Bourbon Vermelho	4,00 x 0,70	2009	17,58	8,64	90	pd	89	30
CT01a	Catuaí Vermelho	4,00 x 0,70	2001	29,57	18,33	42	33	40	27
AR17	Araras	4,00 x 0,70	2017	16,58	36,23	60	3	pn	27
CT01b	Catuaí Vermelho	4,00 x 0,70	2001	30,48	20,90	61	1	55	3

esq: esqueletamento; pd: poda; pn: plantação nova.

Posteriormente, foi realizada a seleção das situações a serem avaliadas na Fazenda Chuá, considerado novamente o NDVI, a avaliação visual em campo e o histórico de manejo das áreas. Seis áreas de cultivo (Tabela 1) (BV06, BA08, BV15, CT01a, AR17 e CT01b), com valores de NDVI entre 0,5 e 0,7, foram selecionadas, as quais representavam áreas conduzidas com sistema de irrigação por gotejamento, mecanização e que estavam em plena produção, critérios esses considerados na escolha. Dessa forma, foram buscadas áreas onde o baixo vigor vegetativo das plantas pudesse estar associado a restrições de subsolo, especialmente por condições físicas. Além das áreas com baixos valores de NDVI, foram selecionadas as áreas BA14 e BV09, que apresentaram valores mais altos (0,81 a 0,92), para contrastar áreas de cultivo mais produtivas da propriedade com as demais áreas de cultivo escolhidas. A produtividade de café (sacas beneficiadas) da última safra do ano 2021 destas áreas é apresentada na Tabela 1.

2.1 Amostragem de solo

Em cada uma das oito áreas de cultivo escolhidas foram abertas duas trincheiras nas entrelinhas de café, com comprimento aproximado de 4 m por 1 m de profundidade, totalizando 16 trincheiras (Figura 2).

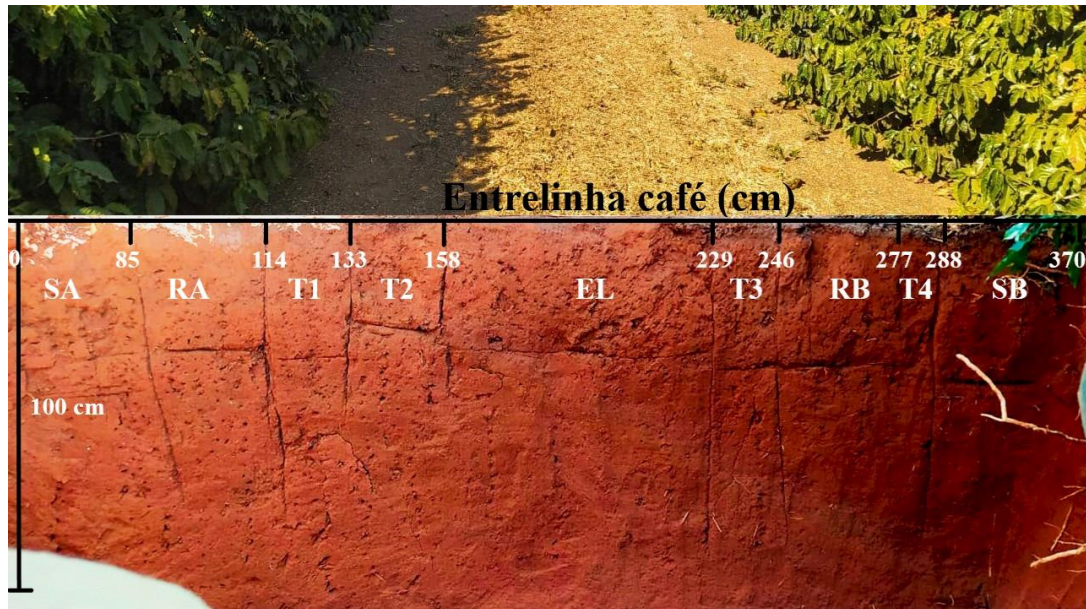


Figura 2. Perfil da trincheira aberta para coleta de amostras deformadas e indeformadas, SA: saia alta; RA: rodado alto; T1: transição 1; T2: transição 2; EL: entrelinhas; T3: transição 3; RB: rodado baixo; T4: transição 4 e SB: saia baixa

Em cada trincheira foram consideradas cinco locais de coleta, cada um definido a partir da posição em relação a planta, à orientação a partir da mangueira de irrigação e a declividade. A primeira delas foi coletada sob a copa das plantas de café até a projeção da copa, sendo realizada, tanto nas linhas de plantas da posição de cota mais alta da superfície do solo, como na linha de plantas mais baixa, sendo denominadas saia alta (SA) e saia baixa (SB), respectivamente. Também amostras foram coletadas na posição em que se caracteriza o tráfego localizado de máquinas agrícolas nas entrelinhas, tanto na parte alta como na parte baixa das entrelinhas, sendo denominados de rodado alto (RA) e rodado baixo (RB) (Figura 2). Por último, amostras foram coletadas no meio das entrelinhas (EL), região que não estava sob influência das plantas, irrigação e mesmo tráfego de máquinas.

As posições e as profundidades de coleta em cada trincheira foram estabelecidas a partir da avaliação em campo da resistência à penetração à ponta de faca de coleta, avaliada em toda a superfície da trincheira aberta, separando-se as áreas de maior e menor resistência, tanto

horizontal quanto verticalmente. Os rodados (RA e RB) foram identificados como os pontos de maior resistência a penetração, coincidindo com a largura dos eixos dos maquinários utilizados, geralmente com alguma faixa de resistência intermediária entre posição da projeção da copa e das entrelinhas (EL). As entrelinhas caracterizam-se por não receber irrigação e estarem sob passagem parcial de máquinas, implementos e veículos. Situações de transição na avaliação da resistência a penetração entre a faixa do rodado e as entrelinhas não foram consideradas para as coletas de amostras (Figura 2).

As amostras deformadas simples, para análises químicas, foram coletadas formando amostras compostas pela combinação das posições SA e SB, originando amostras da saia (S). Também amostras de RA e RB foram coletadas e homogeneizadas originando amostras da posição do rodado (R), assim como também amostras compostas das entrelinhas (EL) também foram obtidas. Para essas amostras considerou-se as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-100 cm, delimitadas conforme a avaliação preliminar de resistência a penetração manual com a ponta da faca de coleta. Os resultados das análises realizadas nestas amostras encontram-se na Tabela 2.

Amostras indeformadas também foram coletadas para a avaliação de propriedades físicas utilizando anéis de 5 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento, para cada uma das posições SA, SB, RA, RB e EL, porém nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm. Assim, obteve o total de 20 amostras indeformadas e 9 amostras deformadas por trincheira coletadas, tendo sido abertas duas trincheiras por área de cultivo.

Tabela 2 - Propriedades químicas e físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de café, variedades: Bourbon vermelho, Bourbon amarelo, Araras, e Catuaí no município de Patos de Minas-MG, Brasil

Áreas de cultivo	Posições	pH H ₂ O	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	P-Rem	COT	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte
			-----mg dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	(mg L ⁻¹)	(dag kg ⁻¹)	-----%-----							
Profundidade 3 (0,4-1 m)														
BV06	Saia (S)	4,39	62,43	72,50	1,18	0,46	0,70	10,50	11,15	2,64	16,33	12,44	42,23	28,75
	Rodado (R)	5,73	103,65	96,00	4,40	1,79	0,00	7,00	14,20	3,21	16,00	11,91	39,77	31,90
	Entrelinha (EL)	6,06	65,00	94,00	3,67	1,55	0,00	6,00	13,35	3,72	16,00	11,01	39,74	33,50
BA08	Saia (S)	4,17	145,35	109,00	1,21	0,46	1,01	11,75	14,85	2,43	16,50	11,57	37,38	34,63
	Rodado (R)	5,88	175,15	187,00	4,76	1,74	0,00	5,85	16,20	2,67	18,00	11,58	27,48	43,12
	Entrelinha (EL)	6,31	236,95	195,00	5,09	2,04	0,00	4,60	15,50	2,35	17,50	10,57	32,96	38,88
BV15	Saia (S)	4,81	84,00	110,00	3,96	0,89	1,08	13,95	11,48	6,56	13,33	10,25	55,28	21,17
	Rodado (R)	5,54	83,25	214,00	6,95	2,12	0,00	9,65	13,35	6,62	10,50	8,20	61,54	19,72
	Entrelinha (EL)	5,31	101,30	128,00	3,54	1,46	0,53	12,95	11,30	6,16	12,00	9,41	63,10	15,70
BA14	Saia (S)	4,47	49,50	71,00	2,73	0,59	0,96	14,35	12,30	4,98	7,00	4,97	70,88	17,13
	Rodado (R)	5,28	43,95	142,00	5,91	1,71	0,00	9,90	15,50	5,54	6,50	4,51	65,24	23,91
	Entrelinha (EL)	5,14	83,60	110,50	5,66	1,69	0,10	12,05	17,25	4,20	6,50	3,42	68,53	21,58
BV09	Saia (S)	4,85	71,23	133,50	3,38	1,33	0,72	10,88	11,63	4,26	3,67	2,34	74,79	19,12
	Rodado (R)	6,16	50,50	133,00	8,10	2,47	0,00	5,45	15,15	4,13	4,00	3,60	66,67	25,85
	Entrelinha (EL)	6,28	14,20	152,00	7,54	2,19	0,00	5,05	15,10	4,12	4,00	2,60	61,64	32,07
CT01a	Saia (S)	4,97	37,40	203,50	2,61	0,63	0,87	12,25	10,65	5,98	3,00	2,98	79,69	14,52
	Rodado (R)	5,75	20,30	143,00	5,55	1,92	0,10	8,65	12,50	5,94	3,00	2,87	74,51	19,88
	Entrelinha (EL)	6,18	7,75	104,00	7,89	2,59	0,00	6,45	11,50	6,06	3,00	2,92	64,87	29,44
AR17	Saia (S)	5,48	283,95	167,50	7,64	1,79	0,00	9,50	18,75	6,77	3,00	3,04	73,53	20,34
	Rodado (R)	5,44	27,20	158,00	5,05	2,00	0,19	10,00	13,60	6,27	2,50	2,99	75,41	18,81
	Entrelinha (EL)	5,28	61,25	114,00	4,07	1,57	0,39	12,00	12,10	6,00	3,00	3,18	77,96	16,14
CT01b	Saia (S)	4,71	85,40	128,00	3,00	0,80	0,92	14,30	9,95	5,60	4,00	3,26	80,18	12,53
	Rodado (R)	5,52	33,75	141,00	4,73	1,45	0,19	10,30	10,15	5,08	3,50	3,44	70,74	22,30
	Entrelinha (EL)	5,59	22,20	75,00	4,83	1,51	0,29	10,15	9,05	4,87	4,00	3,51	78,13	14,36

Áreas de cultivo	Posições	pH H ₂ O	P -----mg dm ⁻³ -----	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	P-Rem mg L ⁻¹	COT dag kg ⁻¹	Areia Grossa	Areia Fina	Argila		Silte
													%		
Profundidade 2 (0,2-0,4 m)															
BV06	Saia (S)	4,80	22,28	111,00	1,25	0,38	0,18	7,52	6,80	2,31	12,33	9,15	49,19	29,37	
	Rodado (R)	5,82	24,40	90,00	2,44	0,97	0,00	5,10	8,35	2,50	12,50	10,10	48,83	28,26	
	Entrelinha (EL)	5,61	20,95	41,00	1,61	0,69	0,00	5,85	7,95	2,15	13,00	11,21	53,94	22,14	
BA08	Saia (S)	3,90	25,00	65,00	0,40	0,14	0,68	8,85	4,95	1,70	15,00	10,27	34,99	39,57	
	Rodado (R)	5,73	32,40	105,00	2,46	0,81	0,00	5,50	8,80	1,96	15,00	10,67	33,77	40,55	
	Entrelinha (EL)	5,99	33,65	100,00	2,49	1,02	0,00	5,05	7,80	1,74	14,50	11,14	38,78	35,79	
BV15	Saia (S)	4,72	15,83	94,50	1,05	0,28	1,16	12,73	5,68	5,39	8,67	9,73	64,75	17,04	
	Rodado (R)	4,69	14,85	93,00	1,04	0,43	1,06	12,55	4,80	5,04	8,00	8,61	70,55	12,67	
	Entrelinha (EL)	4,99	15,30	50,00	2,16	0,54	0,77	12,00	5,95	7,49	8,00	8,47	60,97	22,56	
BA14	Saia (S)	4,81	9,50	127,25	2,63	0,46	0,56	9,73	11,30	3,54	3,00	2,92	81,64	12,45	
	Rodado (R)	4,90	2,70	88,00	1,89	0,61	0,34	8,70	10,90	2,55	3,00	2,35	83,72	11,18	
	Entrelinha (EL)	4,99	7,85	27,50	2,11	0,52	0,63	9,20	10,85	1,63	3,00	2,01	82,91	12,13	
BV09	Saia (S)	4,80	1,65	129,00	2,07	0,62	0,53	8,93	7,98	3,12	3,00	1,84	81,60	13,73	
	Rodado (R)	5,23	0,85	83,00	2,48	0,77	0,15	8,10	9,60	3,19	2,50	1,77	81,83	13,59	
	Entrelinha (EL)	5,48	0,75	63,00	2,80	0,90	0,15	7,45	8,40	2,52	2,50	1,66	81,79	13,79	
CT01a	Saia (S)	4,39	2,70	119,00	1,13	0,33	1,21	11,75	7,50	5,05	2,50	2,70	83,22	11,85	
	Rodado (R)	4,83	3,15	66,00	1,09	0,48	1,16	11,65	8,05	5,15	3,00	2,35	84,53	10,37	
	Entrelinha (EL)	4,97	2,45	39,00	1,18	0,52	0,96	11,55	8,50	5,68	2,00	2,54	85,93	9,14	
AR17	Saia (S)	4,88	5,00	84,00	2,39	0,70	0,72	10,55	11,30	5,42	2,00	2,75	81,70	13,18	
	Rodado (R)	4,56	2,95	75,00	1,33	0,54	0,91	11,15	8,80	5,27	2,50	2,65	83,26	11,70	
	Entrelinha (EL)	4,49	2,60	41,00	0,64	0,23	1,44	11,50	6,20	5,20	2,00	2,62	86,32	8,70	
CT01b	Saia (S)	4,41	10,80	94,00	1,03	0,20	1,45	13,00	6,80	4,59	3,50	3,33	79,67	13,68	
	Rodado (R)	4,70	10,00	42,00	0,79	0,27	1,16	12,35	5,35	4,62	3,50	3,36	79,62	13,61	
	Entrelinha (EL)	4,87	12,45	26,00	0,66	0,26	1,21	12,30	5,80	4,72	3,00	3,76	73,43	19,80	

Áreas de cultivo	Posições	pH H ₂ O	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	P-Rem (mg L ⁻¹)	COT (dag kg ⁻¹)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte
			-----mg dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	Profundidade 3 (0,4-1 m)						-----%-----			
BV06	Saia (S)	5,02	18,55	77,50	1,04	0,35	0,00	5,98	4,65	1,61	11,33	7,98	49,71	31,05
	Rodado (R)	5,50	17,20	57,00	1,22	0,47	0,00	5,45	5,70	1,96	11,50	7,96	52,49	28,41
	Entrelinha (EL)	5,48	17,55	19,00	1,05	0,37	0,00	5,20	6,95	1,57	12,50	8,75	54,99	23,67
BA08	Saia (S)	4,59	20,30	142,00	1,07	0,31	0,00	5,65	5,65	1,17	13,00	10,12	37,43	39,14
	Rodado (R)	5,55	22,40	51,00	1,60	0,59	0,00	5,00	6,10	1,06	15,50	10,68	36,36	37,45
	Entrelinha (EL)	5,65	22,85	40,00	1,32	0,59	0,00	5,45	5,80	1,25	14,50	9,53	39,01	36,85
BV15	Saia (S)	4,59	7,35	103,00	0,75	0,26	1,08	11,88	5,30	4,66	5,00	7,34	67,61	20,02
	Rodado (R)	4,64	4,85	69,00	0,84	0,32	0,92	11,55	5,20	5,71	5,00	7,07	74,55	13,62
	Entrelinha (EL)	4,41	5,10	9,50	0,36	0,13	1,54	12,05	4,30	4,56	5,00	6,02	70,70	17,99
BA14	Saia (S)	4,32	1,40	81,00	1,39	0,34	0,63	8,10	8,40	1,91	2,50	2,75	81,34	13,48
	Rodado (R)	4,66	1,45	54,00	1,07	0,40	0,53	7,85	8,80	3,19	3,00	1,55	83,29	12,40
	Entrelinha (EL)	4,52	0,90	19,50	0,79	0,25	0,72	8,25	7,45	1,04	2,50	1,75	85,47	10,07
BV09	Saia (S)	4,53	0,58	105,00	1,01	0,32	0,56	7,80	6,30	2,34	2,67	2,00	82,24	13,17
	Rodado (R)	4,82	0,50	62,00	0,92	0,34	0,48	7,65	8,20	2,45	2,50	2,03	83,40	12,04
	Entrelinha (EL)	4,90	0,40	37,00	1,00	0,36	0,29	7,65	6,85	2,09	3,00	1,95	82,67	12,53
CT01a	Saia (S)	4,50	1,00	87,00	1,40	0,35	0,82	8,55	8,25	3,74	3,00	2,30	82,44	12,65
	Rodado (R)	4,61	0,95	29,00	0,85	0,48	0,73	8,90	8,45	3,80	2,50	2,55	83,85	11,06
	Entrelinha (EL)	4,71	1,45	8,00	0,86	0,45	0,67	8,60	8,75	4,09	2,00	2,33	82,75	12,44
AR17	Saia (S)	4,42	1,20	40,00	1,38	0,60	0,82	9,65	9,00	4,48	2,50	2,65	82,43	12,45
	Rodado (R)	4,26	1,00	21,00	0,77	0,35	1,06	9,15	7,90	3,90	2,00	2,71	85,26	10,03
	Entrelinha (EL)	4,34	0,95	20,00	0,62	0,16	1,25	9,50	6,70	4,13	2,00	2,42	86,50	8,88
CT01b	Saia (S)	4,48	6,35	61,00	1,13	0,21	1,11	12,30	4,15	4,00	3,50	3,08	81,02	12,33
	Rodado (R)	4,70	5,85	30,00	0,90	0,41	0,97	11,45	4,10	4,32	3,50	3,36	83,58	9,41
	Entrelinha (EL)	4,77	4,65	4,00	0,68	0,31	0,97	11,35	4,50	4,33	4,00	2,85	78,81	14,41

Dados da pesquisa, pH em água: determinado em solução 1:2,5 (solo-solução) por potenciometria; Prem: P remanescente extraído por CaCl₂ e determinado por absorção molecular; O K e o P disponíveis: extraídos com solução de Mehlich 1, sendo o P determinado por colorimetria e o K por fotometria de emissão de chama; Ca²⁺, Al³⁺ e Mg²⁺: extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, na proporção 1:10, com Ca²⁺ e Mg²⁺ e determinados por espectrometria de absorção atômica e o Al³⁺ por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹; H+Al: extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, na relação 1:15 e determinada por titulação com NaOH 0,0606 mol L⁻¹, análises realizadas de acordo com Defelipo e Ribeiro (1997) todas nas amostras deformadas compostas.; COT determinado por oxidação da matéria orgânica via úmida com K₂Cr₂O₇ 0,167 mol L⁻¹ em meio sulfúrico com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988); Areia grossa e fina determinadas por tamisamento, silte e argila pelo método da pipeta de acordo com EMBRAPA (2017) com adaptações de RUIZ (2005) com agitação lenta de 50 rpm por 16 horas; . Argila: < 2µm; silte: (> 2-50 µm); areia grossa (>250-2,000 µm); areia fina (>50-250 µm).

2.2 Radargramas pelo georradar

Os radargramas foram obtidos em duas épocas distintas, uma no mês de junho de 2021, período caracteristicamente de baixa pluviometria, utilizando antena de 400 MHz. Na segunda época, no início das chuvas na região em novembro do mesmo ano, foram utilizadas as antenas de frequência de 400 e 900 MHz. A obtenção dos dados foi realizada por varreduras em transectos localizados próximo às trincheiras, sendo composto por cinco linhas de plantio de café e quatro entrelinhas para um comprimento total aproximado de 16 m.

O equipamento utilizado foi o radar de penetração do solo GSSI TerraSIRch SIR® System-3000, com antenas blindadas nas frequências relatadas, O aparelho foi configurado com o valor de constante dielétrica (k) 3 [Clay soil (dry)] com velocidade de 173 mm ns^{-1} para a primeira passada, no período de seco em junho, e com constante dielétrica (k) igual a 8 [Clay (wet)], limite inferior de k para solo argiloso úmido, com velocidade de 86 mm ns^{-1} devido ao aumento da umidade, considerando o tipo de solo, para o período de novembro, de acordo com o manual de instruções (GSSI, 2008). As varreduras foram feitas em seis áreas de cultivo no mês de novembro na segunda época de coleta de dados, excluindo as áreas CT01a e CT01b, pois estas passaram por atividades de renovação em que toda a área foi revolvida para um novo plantio. Os parâmetros utilizados na aquisição dos radargramas foram: 50 varreduras/metro lineal, 512 amostras/varredura e 16 bits por amostra, A aquisição foi feita mediante a técnica do afastamento constante (*common offset*).

2.3 Processamento dos radargramas

O processamento das imagens foi feito utilizando o software RADAN 7® disponibilizado pelo fabricante do equipamento utilizado, Conforme sugerido por *Geophysical Survey Systems, Inc*, (GSSI) (2008), o processamento das imagens obtidas nos radargramas passa por: (i) etapas de correção da posição (*time zero*) com remoção da faixa aérea entre a antena e a superfície; (ii) a aplicação de filtro de eliminação de plano de fundo (*Background removal*) e de bandas de ruído presentes; (iii) a amplificação dos sinais de baixa amplitude e melhoria da resolução da imagem; e (iv) e a obtenção da janela de ganhos de três pontos melhorando a resolução de hipérbolas para a identificação de valores de k e, profundidade máxima efetiva (*Max Deph*) do radargramas (m) estimando a perda de sinal em profundidade, No entanto, não foi possível a identificação de nenhuma hipérbole nos radargramas visando isolar as constantes dielétricas.

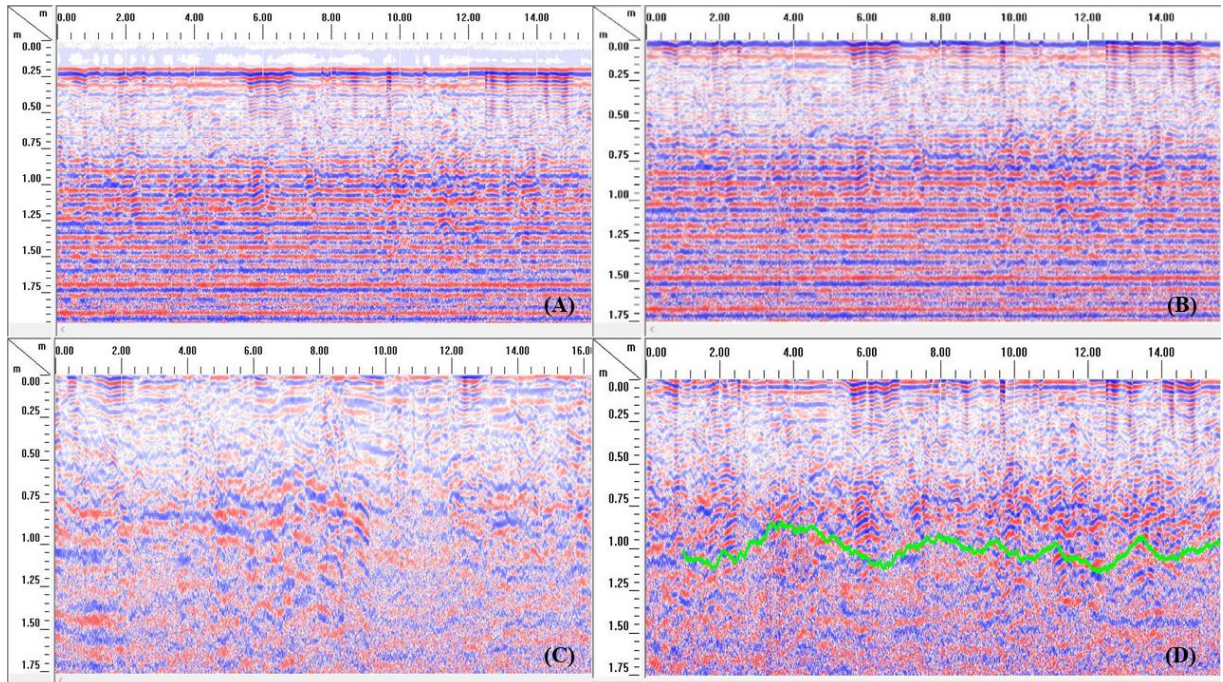


Figura 3 - Etapas do processamento dos radargramas, (A) radargrama primário obtido com antena de 900 MHz; (B) correção da posição (*time zero*); (C) aplicação de filtro de eliminação de plano de fundo (*Background removal*) e; (D) janela de ganhos de três pontos e profundidade máxima efetiva (*Max Depth*) (m).

2.4 Resistência à penetração (RP) em campo

Avaliações da resistência a penetração em condições de campo foram realizadas no mês de novembro de 2021, quando iniciaram as primeiras chuvas na região. Na primeira coleta de dados, a umidade do solo não permitiu essa avaliação pois estava tão baixa que a RP do solo ultrapassava a resistência máxima do equipamento (9500 MPa). Para essa avaliação utilizou-se o equipamento penetrômetro digital Falker modelo PenetroLOG2040, com diâmetro de cone de 12,83 mm, haste com profundidade máxima de penetração de 40 cm e velocidade de inserção máxima de 5 cm s^{-1} . As avaliações foram feitas com duas medições de resistência a penetração em cada posição de cada trincheira: saias alta e baixa (SA e SB), rodados altos e baixos (RA e RB) e entrelinhas (EL) (Figura 2) nas áreas de cultivo BV06, BA08, BV15, BA14, BV09 e AR17.

2.5 Análises físicas

A umidade do solo foi determinada em amostras deformadas coletadas por ocasião das avaliações de resistência a penetração no campo, descritas anteriormente, nas posições SA, RA,

EL, RB e SB (Figura 2) e nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m. A determinação da umidade foi realizada pelo método gravimétrico descrito por Donagemma et al. (2011) em estufa com circulação de ar a 105 °C por 48 horas.

A densidade do solo (D_s) e de partículas (D_p) foram determinadas pelos métodos do anel e do balão volumétricos, respectivamente (EMBRAPA, 2017), possibilitando a estimativa da porosidade total (PT) de acordo com fórmula: $PT = (1 - D_s/D_p)$. A microporosidade (M_i) foi determinada em amostras indeformadas equilibrando amostras em mesa de tensão a 6 kPa, sendo a macroporosidade obtida por diferença entre PT e M_i (EMBRAPA, 2017). A condutividade hidráulica do solo em meio saturado (K_0) foi realizada em anéis, com tempo de estabilização de 60 minutos e altura de coluna de água de 2,5 cm com carga constante, o volume de água foi medido em provetas calibradas de acordo com EMBRAPA (2017). As tensões para a curva de retenção de água no solo (CRA) foram obtidas pelo equilíbrio de amostras indeformadas nas tensões de 1, 6, e 10 kPa em mesa de tensão e nas amostras deformadas as tensões de 100, 300 e 1500 kPa, foram determinadas nas câmaras de Richard. No entanto, devido à quantidade de CRA's geradas, procedeu-se pela análise estatística dos teores de umidade retidos em cada uma das tensões, visto que seriam geradas 160 curvas ao total. A resistência à penetração, medida no penetrômetro digital em bancada modelo TE-096 do Laboratório de Física do Solo, tendo sido avaliada em ponto central de cada amostra indeformada em amostras com umidade equilibrada a 10 kPa, tensão que caracteriza a umidade na capacidade de campo (CC).

2.6 Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos a análise multivariada por componentes principais (PCA), visando identificar aqueles atributos que mais explicassem a variância total. Contudo, inicialmente essas análises foram realizadas com dois grupos de atributos: físicas e químicas, separadamente, obtendo-se o conjunto de atributos, em ordem decrescente de sua contribuição para a variação total dos dados (SILVA et al., 2010). Após essa seleção um novo grupo de atributos foi formado e que se compôs de atributos físicos e químicos, sendo novamente realizada a PCA, sempre considerando atributos com autovalores acima de 1. Posteriormente, cada um dos 12 atributos selecionadas na PCA final, no caso: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Areia Grossa (AG), Areia Fina (AF), Argila (ARG), D_p , RP média, RP máxima, PT e Umidade (θ) nas tensões de 100 e 300 kPa foram analisadas de forma univariada, considerando três situações.

Para aqueles atributos obtidos em amostras deformadas considerou para a ANOVA, um fatorial de $8 \times 3 \times 3$, envolvendo as oito áreas de cultivo (BV06, BA08, BV15, BA14, BV09, CT01a, AR17 e CT01b), as três posições de coleta (saia – S, rodado – R e entrelinhas -E) e três profundidades (0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4 a 1 m). Os atributos das amostras indeformadas foram avaliados como um fatorial $8 \times 5 \times 4$ sendo as oito áreas de cultivo (BV06, BA08, BV15, BA14, BV09, CT01a, AR17 e CT01b), cinco posições de coleta (saia alta - SA, saia baixa - SB, rodado alto - RA, rodado baixo - RB e entrelinhas - EL) e quatro profundidades (0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3 a 0,4 m). Por último, os atributos de umidade do solo e RP de amostras coletadas e determinadas no campo, respectivamente, no mês de novembro, a análise de variância considerou um fatorial $6 \times 5 \times 4$, sendo as áreas de cultivo: BV06, BA08, BV15, BA14, BV09 e AR17 as posições de coleta saia alta - SA, saia baixa - SB, rodado alto - RA, rodado baixo - RB e entrelinhas – EL e as profundidades (0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m). Em todas as situações analisadas considerou um delineamento inteiramente casualizado, com restrições a casualização e duas repetições. Todas as interações significativas e não significativas, pelo teste F nas ANOVAs, foram desdobradas, considerando-se até 5% de probabilidade, independente se triplas ou duplas, utilizando o número de graus de liberdade e os quadrados médios do resíduo adequados. Nos casos em que os efeitos foram significativos pelo teste F, até 5% de probabilidade, as médias foram comparadas pelo teste Tukey, também até 5% de probabilidade. Os desdobramentos das interações triplas foram assim realizados: áreas na posição e profundidade de coletas (A/Pos x Prof); posição de coleta nas área de cultivo e profundidade (Pos/A x Prof); e profundidade nas áreas de cultivo e posição de coleta (Prof/A x Pos). Para as PCAs e ANOVAs e seus desdobramentos utilizou-se o software Statistica, sendo as comparações de médias por Tukey realizadas com a planilha eletrônica Excel.

3 Resultados

3.1 Análise de componentes principais (PCA)

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos pela PCA utilizando separadamente o grupo de atributos físicos, químicos e físicos+químicos (nesse último caso com as variáveis selecionadas por PCA dos dois primeiros conjuntos).

No caso dos grupos atributos físicos, os dois primeiros componentes explicaram 77,49% da variabilidade total, sendo que 43,43% estão associados ao primeiro componente principal, no qual os atributos RP mínima, RP máxima, RP média, PT, θ_{100} kPa e θ_{300} kPa foram os atributos mais associados, todos apresentando escores dos autovalores absolutos $\geq 0,7$. Entre esses atributos, somente PT se correlacionou positivamente, enquanto os demais atributos o foram de forma negativa. O segundo componente (Tabela 3) apresentou 34,06% da variabilidade total entre áreas de estudo, destacando-se os atributos AG, AF, AGR e Dp (escores absolutos de autovalores $\geq 0,7$), sendo que argila se correlacionou negativamente e as demais positivamente.

Tabela 3 – Autovalores, variância explicada (%), variância acumulada (%) e correlação de variáveis em análise de componentes principais em análise de componentes principais envolvendo atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de café, no município de Patos de Minas-MG, Brasil, e a combinação de atributos físicos e químicos selecionados com autovalores > 1 (atributos físicos+químicos)

Atributos físicos			Atributos químicos			Atributos físicos+químicos			
Componente Principal	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2	CP3
Autovalor	4,34	3,40		4,35	1,63		4,85	3,44	1,43
Variância explicada (%)	43,43	34,06		62,22	23,41		40,42	28,74	11,99
Variância Acumulada (%)	43,43	77,49		62,22	85,64		40,42	69,17	81,16
Variável	Correlação ⁽¹⁾			Correlação ⁽¹⁾			Correlação ⁽¹⁾		
Areia Grossa (dag kg ⁻¹)	0,26	0,94*	COT dag kg ⁻¹	0,00	-0,93*	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	-0,60	0,09	0,76*
Areia Fina (dag kg ⁻¹)	0,30	0,89*	pH H ₂ O	0,91	0,1	Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	-0,60	0,19	0,74*
Argila (dag kg ⁻¹)	-0,23	-0,94*	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,91	-0,36	Areia Grossa (dag kg ⁻¹)	0,15	0,95*	-0,09
Dp (g cm ⁻³)	0,43	0,70*	Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,92*	-0,27	Areia Fina (dag kg ⁻¹)	0,20	0,91*	-0,1
RP média (MPa)	-0,85*	0,33	Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	-0,88*	-0,27	Argila (dag kg ⁻¹)	-0,08	-0,96*	-0,06
RP máxima (MPa)	-0,84*	0,31	H+Al (cmol _c dm ⁻³)	-0,72*	-0,63	Dp (g cm ⁻³)	0,34	0,75*	-0,02
RP mínima (MPa)	-0,75*	0,22	P-Rem (mg L ⁻¹)	0,73*	-0,29	RP média (MPa)	-0,88*	0,22	-0,12
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	0,72*	-0,27				RP máxima (MPa)	-0,84*	0,19	-0,21
θ 100 kPa	-0,85*	0,14				RP mínima (MPa)	-0,76*	0,13	-0,09
θ 300 kPa	-0,82*	-0,02				Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	0,73*	-0,17	0,19
						θ 100 kPa	-0,82*	0,02	-0,29
						θ 300 kPa	-0,78*	-0,13	-0,26

Correlações consideradas na interpretação do componente principal; *: escores ≥0,7

Quando se utilizaram os atributos químicos, os resultados da PCA apontaram que os dois primeiros componentes principais explicaram no total 85,64% da variabilidade envolvida com as áreas de cultivo (Tabela 3). O componente principal 1 (CP1), apresentou 62,22% da variabilidade total e os atributos pH em água, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H+Al e P-Rem foram os atributos com escores de autovalores $\geq 0,70$, destacando-se o Al^{3+} e H+Al, os quais apresentaram coeficientes de correlação negativos e os demais atributos positivos. O componente 2 (CP2), somente com a variável COT (escore com autovalor de -0,93), apresentou 23,41% do total da variância envolvida com as diferentes áreas.

Quando aos atributos físicos+ químicos, selecionados nas duas PCAs preliminares foram envolvidos em uma nova PCA, três componentes principais explicaram em conjunto 81,16 % da variância total associadas às áreas estudadas. O componente principal 1 (CP1) explicou 40,24% e envolveu os atributos RP média, RP máxima, RP mínima, PT, θ 100 kPa e θ 300 kPa com escores de autovalores $\geq 0,70$, enquanto o componente 2 (CP2) explicou 28,75 %, nesse caso, envolvendo os atributos areia grossa, areia fina e argila com os maiores escores (0,96, 0,92 e -0,96, respectivamente). Já o terceiro componente (CP3) apresentou uma porcentagem de 11,99 % associada a variabilidade entre áreas, sendo que os atributos Ca^{2+} e Mg^{2+} estiveram mais associados com escores acima de 0,70, nesses casos: 0,77 e 0,75, respectivamente.

As Figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam a dispersão gráfica das áreas e dos atributos estudados para os dois primeiros componentes principais nas profundidades de 0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m, respectivamente. Essas figuras originaram-se da aplicação da PCA considerando todos os atributos físicos+químicos selecionados (escores $\geq 0,7$) envolvendo todas as áreas, posições e profundidades avaliadas. Porém, para facilitar a visualização dos resultados obtidos, separou-se por profundidade, mantendo-se os mesmos escores de cada componente, daí porque todas as figuras apresentam as mesmas porcentagens de explicação da variabilidade das situações estudadas nos componentes principais 1 e 2. Estes eixos somados correspondem a 69,17% de toda a variação amostral, sendo que o eixo correspondente ao CP1 (eixo X) explicou 40,42% da variação total das amostras, enquanto que o CP2 (eixo Y) explicou 28,75%.

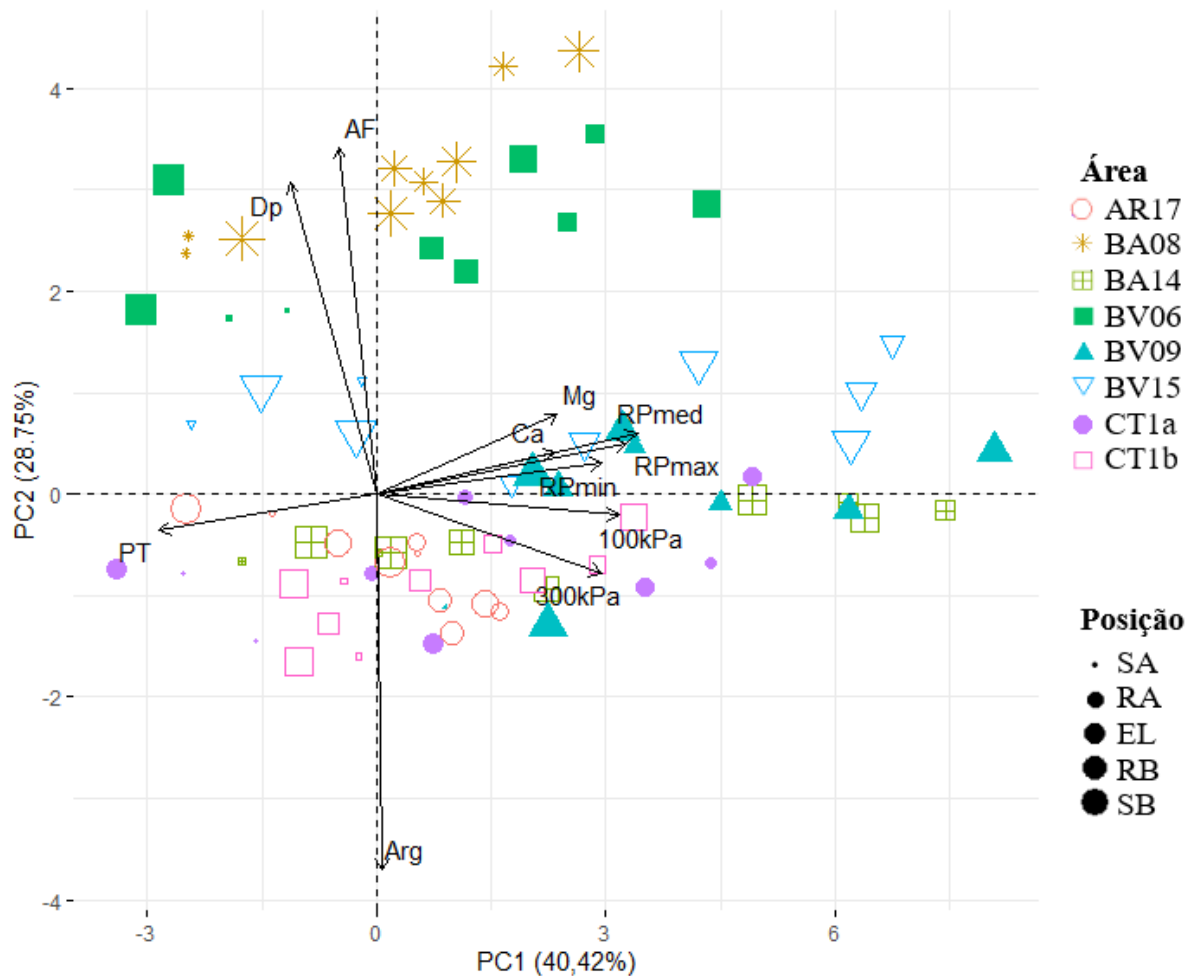


Figura 4. Dispersão gráfica de atributos, áreas e posições de coleta na profundidade 0-0,1 m por componentes principais CP1 e CP2 dos atributos físicos e químicos para um Latossolo Vermelho de Alto Paranaíba-MG; Legenda: Áreas: cultivar Arara plantado em 2017 (AR17), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2008 (BA08), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2014 (BA14), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2006 (BV06), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2009 (BV09), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2015 (BV15), cultivar Catuaí plantado em 2001 área a (CT01a), cultivar Catuaí plantado em 2001 área b (CT01b), Posição Saia Alta (SA), posição Rodado Alto (RA), posição Entrelinha (EL), posição Rodado Baixo (RB), posição Saia Baixa (SB), Densidade de partícula (Dp), Areia Fina (AF), Porosidade Total (PT), Argila (Arg), Resistência à Penetração média (RPmed), Resistência à Penetração máxima (RPmax), Resistência à Penetração mínima (RPmin), Umidade em base volumétrica a 300 kPa (θ 300 kPa), Umidade em base volumétrica a 100 kPa (θ 100 kPa), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg).

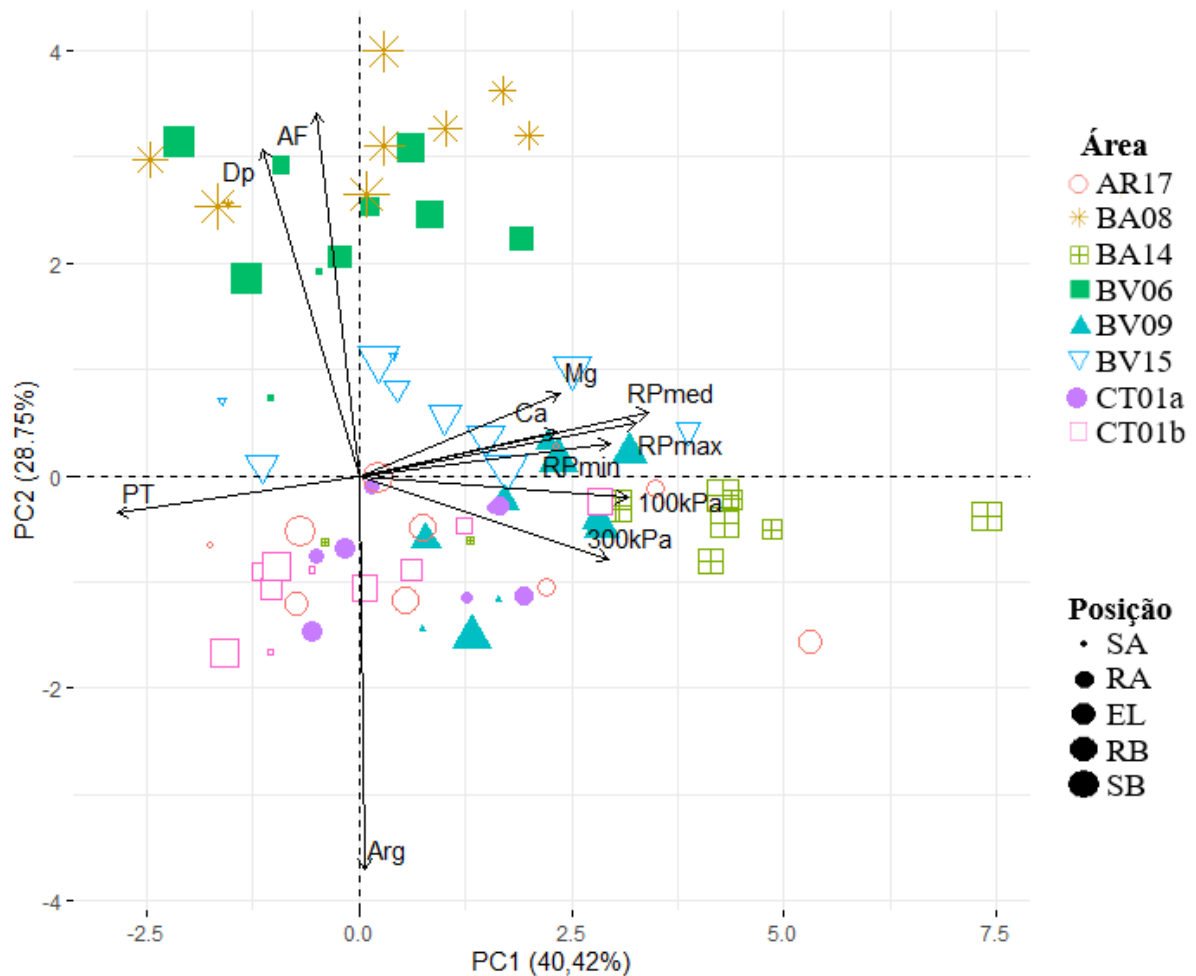


Figura 5. Dispersão gráfica de atributos, áreas e posições de coleta na profundidade 0,1-0,2 m por componentes principais CP1 e CP2 dos atributos físicos e químicos para um Latossolo Vermelho de Alto Paranaíba-MG; Legenda: Áreas: cultivar Arara plantado em 2017 (AR17), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2008 (BA08), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2014 (BA14), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2006 (BV06), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2009 (BV09), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2015 (BV15), cultivar Catuaí plantado em 2001 área a (CT01a), cultivar Catuaí plantado em 2001 área b (CT01b), Posição Saia Alta (SA), posição Rodado Alto (RA), posição Entrelinha (EL), posição Rodado Baixo (RB), posição Saia Baixa (SB), Densidade de partícula (Dp), Areia Fina (AF), Porosidade Total (PT), Argila (Arg), Resistência à Penetração média (RPmed), Resistência à Penetração máxima (RPmax), Resistência à Penetração mínima (RPmin), Umidade em base volumétrica a (θ) a 300 kPa (θ 300 kPa), Umidade em base volumétrica (θ) a 100 kPa (θ 100 kPa), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg).

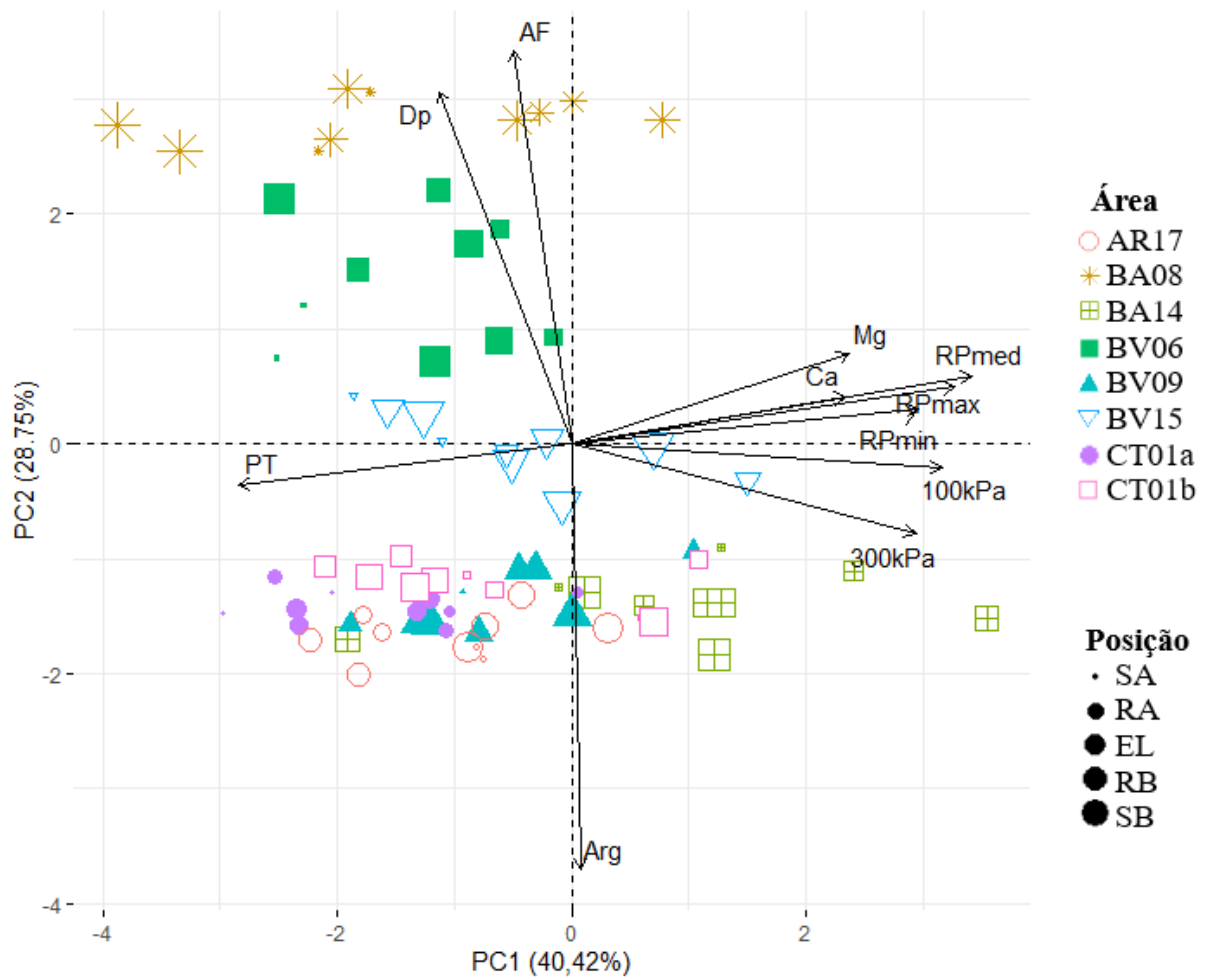


Figura 6. Dispersão gráfica de atributos, áreas e posições de coleta na profundidade 0,2-0,3 m por componentes principais CP1 e CP2 dos atributos físicos e químicos para um Latossolo Vermelho de Alto Paranaíba-MG; Legenda: Áreas: cultivar Arara plantado em 2017 (AR17), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2008 (BA08), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2014 (BA14), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2006 (BV06), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2009 (BV09), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2015 (BV15), cultivar Catuaí plantado em 2001 área a (CT01a), cultivar Catuaí plantado em 2001 área b (CT01b), Posição Saia Alta (SA), posição Rodado Alto (RA), posição Entrelinha (EL), posição Rodado Baixo (RB), posição Saia Baixa (SB), Densidade de partícula (Dp), Areia Fina (AF), Porosidade Total (PT), Argila (Arg), Resistência à Penetração média (RPmed), Resistência à Penetração máxima (RPmax), Resistência à Penetração mínima (RPmin), Umidade em base volumétrica (θ) a 300 kPa (θ 300 kPa), Umidade em base volumétrica (θ) a 100 kPa (θ 100 kPa), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg).

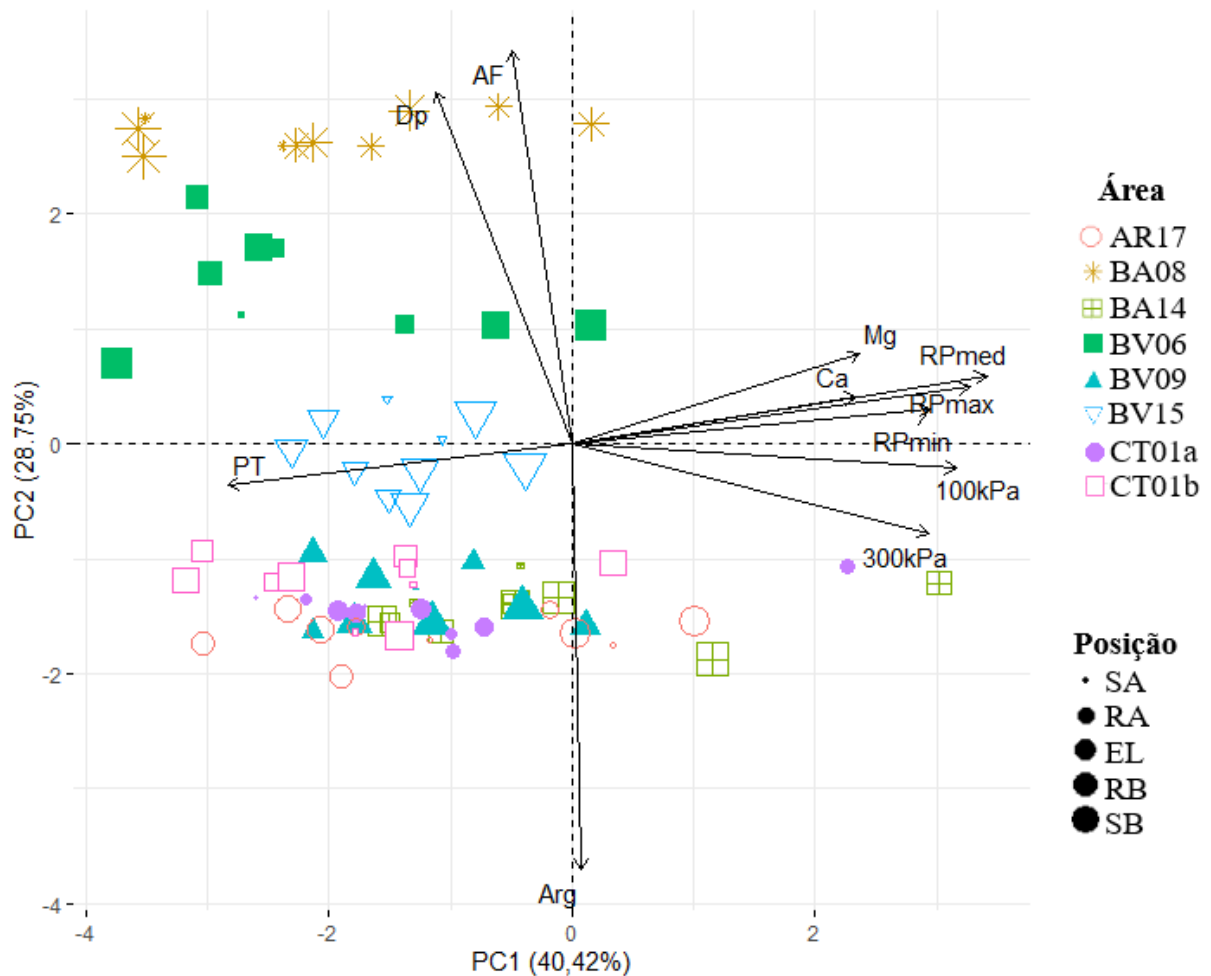


Figura 7. Dispersão gráfica de atributos, áreas e posições de coleta na profundidade 0,3-0,4 m por componentes principais CP1 e CP2 dos atributos físicos e químicos para um Latossolo Vermelho de Alto Paranaíba-MG; Legenda: Áreas: cultivar Arara plantado em 2017 (AR17), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2008 (BA08), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2014 (BA14), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2006 (BV06), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2009 (BV09), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2015 (BV15), cultivar Catuaí plantado em 2001 área a (CT01a), cultivar Catuaí plantado em 2001 área b (CT01b), Posição Saia Alta (SA), posição Rodado Alto (RA), posição Entrelinha (EL), posição Rodado Baixo (RB), posição Saia Baixa (SB), Densidade de partícula (Dp), Areia Fina (AF), Porosidade Total (PT), Argila (Arg), Resistência à Penetração média (RPmed), Resistência à Penetração máxima (RPmax), Resistência à Penetração mínima (RPmin), Umidade em base volumétrica (θ) a 300 kPa (θ 300 kPa), Umidade em base volumétrica (θ) a 100 kPa (θ 100 kPa), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg).

A dispersão gráfica das áreas de cultivo e posições de coleta na profundidade 0,0-0,1 m (Figura 4), considerando o CP1 como referência, aponta para a proximidade das oito áreas quanto às posições de coleta RA, EL e RB, grande parte ocupando os dois quadrantes (superior e inferior) do lado direito. Já as posições de coleta SA e SB ocorrem nos quadrantes opostos,

ou seja, mais distantes das demais posições, mas próximas entre elas. Algumas áreas apresentam a posição de coleta EL dispersas graficamente de forma intermediária entre as posições RA e RB e as posições SA e SB. A dispersão em relação ao CP2 indicou maior proximidade entre as áreas BA14, BV09, CT01a, CT01b e AR17 para todas as posições de coleta, distribuindo-se em maior número de casos próximos e/ou abaixo do CP2 nos quadrantes esquerdo e direito. As áreas BV06 e BA08 apresentam-se próximas entre elas em todas as posições de coleta e distantes das áreas BA14, BV09, CT01a, CT01b e AR17, sendo BV15 intermediária entre os dois grupos dessas áreas. A dispersão das áreas em relação a CP1, os atributos associados a distribuição das áreas e posições de coleta são: RP média, RP máxima, RP mínima, PT, θ 100 kPa e θ 300 kPa. No segundo caso, dispersão em relação a CP2, os atributos Dp, AG, AF e ARG foram os que mais contribuíram para a separação das áreas.

A dispersão das áreas e posições de coleta na profundidade de 0,1-0,2 m (Figura 5) foi muito semelhante a apresentada na profundidade 0,0-0,1 m (Figura 4), com tendência de maior proximidade entre áreas e posições de coleta ao considerar o CP1, sendo que, em relação ao CP2, não se observou o mesmo comportamento.

Nas profundidades de 0,2-0,3 m (Figura 6) e 0,3-0,4 m (Figuras 7), a dispersão das situações de estudo (áreas e posições de coleta) em relação ao CP1 tenderam a maior proximidade, estando localizados em grande parte nos quadrantes superior e inferior esquerdos, diferente do observado nas profundidades 0,0-0,1 m (Figura 4) e 0,1-0,2 m (Figura 5), as quais distribuem mais uniformemente nos quadrantes dos lados esquerdo e direito. As situações estudadas e sua distribuição podem ser associadas, no primeiro caso (quadrantes do lado esquerdo) à PT e, no segundo (quadrantes do lado direito) aos atributos: RP média, RP máxima, RP mínima, PT, θ 100 kPa e θ 300 kPa. Já, em relação ao CP2, a dispersão de áreas e posições de coleta nas profundidades 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m apresentaram-se semelhante ao já observado nas profundidades 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m.

3.2 Análises de variância das interações triplas

De acordo com os resultados das PCAs realizadas, são apresentados os resultados das análises univariadas para os atributos selecionados, considerando a ANOVA apropriada para cada uma dessas. Como já comentado, todas as interações foram desdobradas, independente se significativas ou não, porém serão apresentados somente os resultados dos desdobramentos das

interações triplas significativas pelo teste F ($p < 0.05$), optando-se por apresentar os resultados de forma individualizada, considerando cada um dos atributos.

3.2.1 Porosidade total (PT)

As comparações entre posições de coleta, numa mesma de área e profundidade, apontaram que a PT foi maior ($p < 0,05$) nas áreas de cultivo BV15, BA14 e CT01, na profundidade 0-0,1 m, posições SA e SB, sendo que as posições RA e RB apresentaram as menores médias ($p < 0,05$). À exceção de BV15, os menores valores ($p < 0,05$) de PT ocorreram em EL, a qual, na maioria das vezes, apresentou valores intermediários entre as saias (SA e SB) e os rodados (RA e RB). No caso de BV15, as médias não diferiram das posições RA e RB ($p > 0,05$) (Tabela 4). Na profundidade 0,1-0,2 m, BA14 teve o mesmo comportamento observado em 0,0-0,10 m, assim como o de CT01a, com as posições SA e SB, apresentando valores maiores ($p < 0,05$), intermediários em EL e menores médias ($p < 0,05$) em RA e RB. AR17 não apresentou diferenças de PT para nenhuma das posições na profundidade 0-0,1 m ($p > 0,05$). Na profundidade 0,1-0,2 m, as posições SB, SA, RB, e RA não diferiram entre si ($p > 0,05$), no entanto, em EL, a PT foi menor que nas demais ($p < 0,05$).

Tabela 4 - Médias de porosidade total (m^3m^{-3}) de um Latossolo nas posições de colheita sob a planta (saia alta – SA e baixa – SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto – RA e baixo – RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinhas (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0,0-0,1 m					
BV06	0,60	0,58AB	0,57 β	0,57	0,63
BA08	0,61	0,59A	0,58	0,59	0,59 α
BV15	0,65b	0,58ABab β	0,56b β	0,56b β	0,66a
BA14	0,63a	0,49Bb β	0,56ab	0,51b β	0,62a
BV09	0,60	0,56Aba α	0,53 β	0,56a β	0,58
CT01a	0,67a	0,57Abba α	0,61ab	0,56b β	0,64ab
AR17	0,64a	0,60Aa	0,57a $\alpha\beta$	0,61a	0,66a α
CT01b	0,62	0,59A	0,61	0,59	0,63
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	0,59	0,61AB	0,55ABC β	0,59A	0,60A
BA08	0,60	0,54AB	0,63A	0,60A	0,58A α
BV15	0,64	0,61Aba $\alpha\beta$	0,62Aba β	0,62A $\alpha\beta$	0,59A
BA14	0,59a	0,52Bab β	0,53Bcab	0,47Bb β	0,55Aab
BV09	0,57	0,56Aba α	0,57ABCa β	0,54Ab β	0,57A
CT01a	0,64	0,59Aba α	0,63A	0,59A $\alpha\beta$	0,62A
AR17	0,65a	0,58Abab	0,51Cb β	0,60Aa	0,65Aa α
CT01b	0,63	0,64A	0,60AB	0,61A	0,68A
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	0,58A	0,56AB	0,62a β	0,56A	0,56A
BA08	0,62A	0,60AB	0,59	0,63A	0,65A α
BV15	0,65A	0,65Aa β	0,66a	0,65Aa	0,62A
BA14	0,57A	0,58Ba β	0,54	0,57Aa β	0,56A
BV09	0,60A	0,62Aba α	0,62a	0,62Aa β	0,59A
CT01a	0,66A	0,64Aa	0,67	0,65Aa	0,65A
AR17	0,58A	0,64AB	0,63a	0,62A	0,60A α
CT01b	0,61A	0,62A	0,66 546	0,66A	0,61A
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	0,60	0,60	0,66A α	0,60	0,59
BA08	0,64	0,60	0,59A	0,62	0,65 α
BV15	0,64	0,67a	0,68A α	0,67a	0,61
BA14	0,59	0,62a	0,56A	0,62a	0,55
BV09	0,62	0,63a	0,64Aa	0,64a	0,60
CT01a	0,66	0,65a	0,61A	0,64a β	0,63
AR17	0,59	0,62	0,64Aa	0,65	0,58a
CT01b	0,64	0,67	0,67A	0,66	0,65

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediário); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro); quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade.

A porosidade total (PT), quando as áreas foram comparadas na mesma posição de coleta e profundidade, apresentou diferenças significativas em 0-0,10 m (RA), 0,2-0,3 m (RA, EL, RB e SB) e 0,20-0,30 m (SA, RA e SB) e em 0,3-0,4 m (EL). Em 0,0-0,10 m, AR17, BA08 e CT01b foram observados os maiores valores ($p < 0,05$) entre as áreas de cultivo, porém, não diferiram estatisticamente de BV06, BV15, CT01a e BV09 ($p > 0,05$). A exceção foi BA14 com a menor média ($0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na posição RA (Tabela 4), não diferindo também de BV06, BV15, CT01a e BV09 ($p > 0,05$). Nas posições RA, EL e RB, em 0,1-0,2 m, os valores médios e as diferenças ou não ($p < 0,05$) de PT para as diferentes áreas de cultivo apresentaram comportamento variado. No entanto, BA14 caracterizou-se por apresentar a menor ($p < 0,05$) PT em todas as posições citadas. Não foram observadas diferenças entre as oito áreas de cultivo ($p > 0,05$) em SB, nas profundidades 0,1-0,2m e 0,2-0,3m, SA e RB em 0,2-0,3 m e EL em 0,3-0,4m. Nas profundidades 0,2-0,3 m, para EL foram observadas diferenças significativas entre BA14 e CT01a, BV15 e CT01b, sendo estas áreas de cultivo as que apresentaram as maiores médias ($p < 0,05$) de PT, enquanto em BA14 foram observados os menores valores ($p < 0,05$; $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Entre profundidades, numa mesma área de cultivo e posição de coleta, a PT mostrou uma relação direta com o seu aumento, ou seja, à medida que se aumentava as profundidades, a PT também aumentava, às vezes com similaridades ou diferenças estatísticas significativas. Tal comportamento foi evidente na maioria das situações avaliadas, à exceção de BV09 e CT01a em RA, BA08 e AR17 em SB, e AR17 em SB, os quais não tiveram diferenças estatísticas significativas entre as profundidades ($p > 0,05$) (Tabela 4).

3.2.2 Resistência à penetração média (RPmed), máxima (RPmax) e mínima (RPmin) em amostras indeformadas

Na Tabela 5 encontram-se os valores de RPmed obtidos no penetrômetro digital de bancada com as amostras indeformadas das diferentes situações de estudo. Na profundidade de 0,0-0,1 m, as comparações na mesma área de cultivo e profundidade, apontaram os maiores ($p < 0,05$) valores de Rpméd nas posições RA e RB em BV06, BA08, BA14 e CT01a, comparativamente à EL, SA e SB. Contudo, em BV15 e nas posições RB, EL e RA, os valores de RPmed não diferiram entre si ($p > 0,05$), porém, em relação a SA e SB, cujos valores médios foram de 0,84 e 0,97 Mpa, respectivamente, esses foram os mais baixos observados ($p < 0,05$). BV09, ainda em 0,0-0,1 m, apresentou Rpméd de 3,67 Mpa em RB, valor esse que foi superior

estatisticamente de 1,49 e 1,33 Mpa de SA e SB, porém, EL e RA não diferiram das demais posições ($p>0,05$).

Nas demais profundidades (também para AR17 e CT01b em 0,0-0,1 m), as comparações entre as posições de coleta para a mesma área de cultivo não se mostraram significativas ($p>0,05$), tendo como única exceção as diferenças observadas de R_{pmed} em BA14, nesse caso em 0,1-0,2 m. Em BA14, SB e RB apresentaram as maiores médias ($p<0,05$), sendo as menores médias ($p<0,05$) observadas em SA, enquanto RA e EL apresentaram valores intermediários (2,52 e 2,18 Mpa), similares entre si (Tabela 5).

Tabela 5 – Médias de resistência à penetração média (MPa) de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta – SA e baixa – SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto – RA e baixo – RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	0,99b	2,77ABaα	1,79ABCab	2,60ABaα	0,83b
BA08	0,51b	1,93Ba	1,46BCab	2,53ABaα	1,22ab
BV15	0,84b	2,68ABaα	3,13Aaα	3,33Aaα	0,97b
BA14	1,11b	3,55Aaα	1,51BCb	3,51Aaα	1,38bβ
BV09	1,34b	2,46ABabα	2,49ABabα	3,67Aaα	1,94b
CT01a	0,71b	2,24ABabα	0,81Cb	2,93Aaα	0,94b
AR17	1,01	1,34Bαβ	1,40BC	1,36B	0,68
CT01b	1,17	1,84B	0,96C	2,03B	0,98
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	0,99	1,33β	1,41	1,50αβ	1,15A
BA08	1,16	1,41	1,31	1,47αβ	1,24A
BV15	0,9	1,69αβ	1,10β	1,94β	1,16A
BA14	1,3 b	2,53abαβ	2,19ab	2,74aα	2,82Aaα
BV09	1,67	1,63αβ	0,99β	1,81β	1,61A
CT01a	0,99	1,43αβ	0,64	1,53β	1,11A
AR17	1,43	2,15α	1,27	1,24	1,16A
CT01b	1,03	1,06	1,03	1,4	0,92A
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	0,81	1,21β	1,03	0,75β	0,75
BA08	1,35	1,49	1,19	1,40αβ	0,51
BV15	0,99	1,48αβ	1,14β	1,14β	1,18
BA14	1,26	1,69β	1,15	1,44β	1,44β
BV09	0,84	1,09β	0,82β	0,94β	1,00
CT01a	0,55	1,28αβ	0,81	0,71β	0,84
AR17	0,75	0,73β	0,69	1,17	1,11
CT01b	1,29	1,4	0,7	0,99	0,98
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	0,55	0,67β	0,6	0,76β	0,77
BA08	0,83	1,33	0,93	0,83β	0,43
BV15	0,98	0,84β	0,65β	0,86β	1,07
BA14	0,68	0,67β	1,51	0,75β	1,13β
BV09	0,83	0,72β	0,93β	0,73β	1,06
CT01a	0,66	0,68β	1,34	0,75β	0,67
AR17	0,94	1,06αβ	0,54	0,64	1,51
CT01b	0,85	0,94	0,75	1,12	0,91

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

A resistência à penetração máxima (RPmax) (Tabela 6), assim como RPmed, apresentaram diferenças significativas entre áreas, quando comparadas numa mesma posição de coleta e profundidade, como em 0,0-0,1 m, no caso em seis das oito áreas (exceto AR17 e CT01b). De modo geral, observaram-se as maiores médias de RPmax ($p < 0,05$) em RA e RB nas áreas de cultivo BV06, BA08, BV14, BV09 e CT01a, comparativamente às demais posições (EL, SA e SB). Uma única exceção deve ser ressaltada e está associada a BA14, nas profundidades 0,1-0,2 m e 0,3-0,4 m, pois foi a única área que apresentou diferenças ($p < 0,05$) entre posições, quando, diferentemente do comportamento observado até o presente, verificando-se a seguinte ordem de valores de RPmax: $RB=SB \geq EL=RA < SA$ ($p < 0,05$) e $EL \geq SB=RA=SA > RB$ ($p < 0,05$).

O comportamento observado para RPmax também foi verificado para resistência à penetração mínima (RPmin) (Tabela 7), ou seja, as diferenças quando ocorreram, o foram na profundidade de 0,0-0,1 m, mas diferentemente para algumas áreas de cultivo, no caso BV06, BA14 e BV09. Nessas situações, os maiores ($p < 0,05$) valores de RPmin localizaram-se em RA e RB, sendo que RB foi superior (BV06 e BV09), semelhante (BV15) ou menor (BA14) que RA. CT01a não apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) nessa profundidade, apesar das médias numericamente mostrarem o mesmo comportamento das áreas de cultivo BV06, BA14 e BV09.

Na comparação entre áreas de cultivo em cada posição e profundidade, diferenças estatísticas foram observadas entre RPmed (Tabela 5) na profundidade 0,0-0,1 m nas posições de coleta RA, EL e RB, e de 0,1-0,2 m em SB. Nas demais situações, as interações não foram significativas ($p < 0,05$) não tendo sido desdobradas. Em 0-0,1 m e na posição de coleta RA, BA14 apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de RPmed (3,55 Mpa), seguido dos valores intermediários das áreas BA06 (2,76 Mpa), BV15 (2,67 Mpa), BV09 (2,46 Mpa) e CT01a (2,23 Mpa), enquanto BV08 (1,93 Mpa), CT09b (1,84 Mpa) e AR17 (1,34 Mpa) apresentaram os menores valores ($p < 0,05$). Em 0,0-0,1 m, BV15 apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de RPmed em EL (3,13 Mpa), seguido dos valores intermediários das áreas de cultivo BV09 (2,49 Mpa), BV06 (1,79 Mpa), BA14 (1,51 Mpa), BA08 (1,46 Mpa), AR17 (1,40 Mpa), sendo os menores CT01b (0,96 Mpa) e CT01a (0,81 Mpa) ($p < 0,05$). Na posição RB e ainda em 0,0-0,10 m, constatou-se os maiores valores ($p < 0,05$) de RPmed nas áreas de cultivo BV09, BA14, BV15 e CT01a (3,67, 3,51, 3,32, e 2,93 Mpa, respectivamente), intermediários em BV06 e BA08, e os menores valores em CT01b e AR17 ($p < 0,05$). Já na posição de coleta SB, na profundidade 0,1-0,2 m, não foram verificadas diferenças significativas entre as áreas de coleta.

A resistência à penetração máxima (RPmax) foi significativa quando comparada nas interações de posição de coleta no nível de área por profundidade como também profundidade no nível de área por posição (Tabela 6), levando ao seu desdobramento. Mesmo desdobrando, observou-se que algumas posições de coleta não apresentaram diferenças significativas entre as áreas de cultivo: SA e SB em 0,0-0,1 m; SA, RA e EL em 0,1-0,2 m; EL, RB e SB em 0,2-0,3 m; SA, RA, RB e SB em 0,3-0,4 m. Os demais casos serão abordados a seguir.

Nos casos de diferenças existentes entre áreas de cultivo, os maiores ($p < 0,05$) valores de R_{pmax} estão associados a RA ou RB. A profundidade 0,0-0,1 m, BA14 apresentou o maior ($p < 0,05$) valor de R_{pmax} em RA, 4,61 Mpa, enquanto o menor deles foi em AR17 (1,69 Mpa). As áreas de cultivo BV06, BA08, BV15, BV09, CT01a e CT01b não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, nem mesmo com BA14 e AR17. Esse mesmo comportamento em RA (0,0-0,1 m) também se repetiu em 0,2-0,3 cm, com maiores e menores valores de 3,53 Mpa e 0,89 Mpa para BA14 e AR17, respectivamente.

Na posição de coleta RB em 0,0-0,1 Mpa, observou-se a similaridade estatística de BV15, BA14, BV09 e CT01a, contudo com os maiores valores ($p < 0,05$) de R_{pmax} (4,47 a 3,91 Mpa) entre as situações avaliadas. BV06, BA08 e CT01b, semelhantes entre si ($p > 0,05$), apresentaram valores intermediários aos menores observados em AR17. Na profundidade 0,1-0,2 m, novamente BA14 apresentou o maior valor ($p < 0,05$) de R_{pmax} (4,02 Mpa) entre as áreas, enquanto BV06, BA08, BV15, BV09, CT01a e CT01b apresentou valores semelhantes ($p > 0,05$) e intermediários, sendo AR17 a área de cultivo com o menor ($p < 0,05$) valor de R_{pmax} (1,59 Mpa).

Diferentemente do esperado, a posição SB apresentou diferenças estatísticas ($p < 0,05$) na profundidade de 0,1-0,2 m, quando a similaridade era a mais esperada, como ocorrido nas demais profundidades avaliadas. Nessa profundidade, BA14 apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de R_{pmax} (4,34 Mpa), enquanto BV06, BA08, BV15, CT01a, AR17 e CT01b foram similares estatisticamente e os menores ($p < 0,05$) observados, com BV09 com valor intermediário (2,69 Mpa). Outra situação também atípica e não esperada foram as diferenças estatísticas observadas das entrelinhas entre as áreas de cultivo. Novamente, BA14 apresentou os maiores valores ($p < 0,05$), 3,49 Mpa, sendo que as outras áreas apresentaram valores baixos oscilando entre 0,62 Mpa e 1,13 Mpa, e similares entre si ($p > 0,05$). A área de cultivo CT01a apresentou R_{pmax} de 2,29 Mpa, o qual esteve entre os dois grupos de áreas citados anteriormente.

O comportamento da resistência a penetração mínima (R_{pmin}) apresentou diferenças estatísticas significativas nas duas primeiras profundidades, no caso nas posições RA, EL e RB, em 0,0-0,1 m e somente RA em 0,1-0,2 m. Nas demais situações não foram observadas significâncias das interações testadas (posições de coleta x profundidades). Em RA a 0,0-0,1 m, BA14 apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de R_{pmin} , R_{pmed} e R_{pmax} , seguido de BV06, BV15 e BV09 com valores intermediários a BA08, CT01a, AR17 e CT01b, as áreas de cultivo com menores valores ($p < 0,05$). Em RB, diferente de RA, BV09 foi a área de cultivo que apresentou o maior ($p < 0,05$) valor de R_{pmin} , enquanto em BA08, BV15, AR17 e CT01b observaram-se os menores ($p < 0,05$), com BV06 e BA14 apresentando os menores valores de R_{pmin} ($p < 0,05$). Na posição EL em 0,0-0,1 m, também diferentes de RA e RB, os maiores valores de R_{pmin} foram associados à área BV15, seguido de BV09, esta similar a BV06, AR17, BA14 ($p > 0,05$). Os menores ($p < 0,05$) valores em EL ocorreram nas áreas CT01a, CT01b, BA08. Na profundidade 0,1-0,2 m, o desdobramento da interação mostrou que em RA a R_{pmin} foi maior ($p < 0,05$) em AR17 (1,54 Mpa), uma área pouco comum de se ter observado valores elevados comparativamente às outras situações. A R_{pmed} e R_{pmax} em BA14 foi similar aos valores de AR17 ($p > 0,05$). CT01a e CT01b foram as áreas com menores valores de R_{pmin} ($p < 0,05$), estando as demais intermediárias ou similares entre si ($p > 0,05$).

Ao avaliar a profundidade nas áreas de cultivo e posição de coleta, os resultados obtidos de R_{pmed} , R_{pmax} e R_{pmin} (Tabelas 5, 6 e 7) não indicaram a existência de diferenças significativas ($p > 0,05$) em SA. Em SB, por outro lado, verificou-se que BA14 foi a única área de cultivo que apresentou diferenças estatísticas, observando-se maiores valores de R_{pmed} (2,82 Mpa) e R_{pmax} (4,34 Mpa) em 0,1-0,2 m, porém R_{pmin} não apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$). Em RA e RB, a interação dos atributos foi significativa para um maior número de áreas de cultivo. Constatou-se os maiores valores de R_{pmed} e R_{pmax} ($p < 0,05$) em 0,0-0,1 m, sendo que em 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, observaram-se valores que são semelhantes estatisticamente entre si ou são maiores em 0,1-0,2 m. Nas profundidades de 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m, os valores de R_{pmed} e R_{pmax} são menores ($p < 0,05$) que as profundidades de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m. A interação não foi significativa para todas as áreas estudadas e o comportamento comum observado, relatado anteriormente, dos três atributos ocorreu com BA1, BV09 e CT01a. BV06, BV15 e BA08 e AR17 apresentaram o mesmo comportamento citado, porém para no máximo duas das variáveis avaliadas.

A posição de coleta RB apresentou comportamento parecido com RA, sendo que R_{pmed} e R_{pmax} foram os atributos que apresentaram maior número de interações significativas quanto

à área de cultivo, o que não aconteceu em AR17 e CT01b. Nas demais áreas de cultivo, constatou-se que os valores de R_{pm} e R_{max} foram maiores em 0,0-0,1 m ($p < 0,05$), sendo que em 0,1-0,2 m ou 0,2-0,3 m esses atributos apresentaram comportamento semelhante ($p > 0,05$) aos maiores e menores valores de R_{pm} ou R_{max} em 0,0-0,1 m ou em 0,3-0,4 m. Porém, é comum a todas as áreas os menores valores ($p < 0,05$) de R_{max} e R_{pm} em 0,3-0,4 m. R_{min} apresentou interação significativa somente para as áreas de coleta BV06, BA14 e BV09, que, quando desdobradas, não foram observadas diferenças entre as profundidades.

Tabela 6 – Médias de resistência à penetração máxima (MPa) do solo nas posições de coleta sob a planta (saia alta – SA e baixa – SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto – RA e baixo – RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	1,27Ab	3,68Aba α	2,33Abab	3,68Aba α	1,19Ab
BA08	0,94Ab	2,41Ababa	1,99Abab	3,70Aba α	2,29Aab
BV15	1,24Ab	3,89Aba α	4,16Aa α	4,47Aa α	1,38Ab
BA14	1,46Ab	4,61Aa α	2,06Abb	4,45Aa α	2,29Ab β
BV09	1,74Ab	3,22Ababa	2,92Ababa	4,38Aa α	2,53Ab
CT01a	0,83Ac	3,02Ababa	1,14Bbc	3,91Aa α	1,31Abc
AR17	1,46A	1,69B	1,76B	1,60B	0,80A
CT01b	1,46A	2,40AB	1,17B	2,70AB	1,28A
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	1,20A	1,76A β	1,80A	2,03Ab $\alpha\beta$	1,47B
BA08	1,61A	1,88A α	1,60A	1,79Ab β	1,60B
BV15	1,15A	2,84Aa β	1,52A β	2,46Ab β	1,69B
BA14	1,98Ab	3,17Aaba β	2,99Aab	4,02Aa $\alpha\beta$	4,34Aa α
BV09	2,19A	2,04Aa β	1,26Aa β	2,29Ab $\alpha\beta$	2,18AB
CT01a	1,27A	1,77Aa β	0,81A	1,95Ab β	1,38B
AR17	1,66A	2,46A	1,68A	1,59B	1,30B
CT01b	1,17A	1,34A	1,25A	1,92AB	1,26B
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	0,91A	1,55Ab β	1,20A	1,06A β	1,43A
BA08	1,61A	2,04Aba	1,37A	1,95Aa β	1,19A
BV15	1,42A	2,06Ab β	1,42A β	1,29A β	1,65A
BA14	2,74A	3,54Aa	2,38A	2,56A β	2,44A β
BV09	1,39A	2,17Aba β	1,06A β	1,21A β	1,47A
CT01a	0,75A	1,56Aba β	1,29A	1,13A β	1,04A
AR17	1,16A	0,89B	0,77A	1,38A	1,36A
CT01b	1,68A	1,72AB	0,96A	1,20A	1,25A
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	0,72A	0,87A β	0,79B	1,08A β	1,22A
BA08	1,04A	1,68A α	1,08B	1,71A β	1,04A
BV15	1,54A	1,07A β	0,88B β	1,03A β	1,56A
BA14	1,61Aab	1,69Aab β	3,49Aa	1,14Ab β	2,55Aaba β
BV09	1,15A	1,19A β	1,13Ba β	1,00A β	1,55A
CT01a	0,82A	0,87A β	2,29AB	1,09A β	0,88A
AR17	1,55A	1,20A	0,62B	0,79A	2,19A
CT01b	1,12A	1,22A	1,09B	1,49A	1,21A

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

Tabela 7 – Médias de resistência à penetração mínima (MPa) de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta – SA e baixa – SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto – RA e baixo – RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	0,53bc	1,26ABab α	0,95ABabc	1,36ABa α	0,42c
BA08	0,63	0,89B	0,67AB	0,74B	0,50
BV15	0,34c	1,06ABab	1,41Aa α	1,11Bab	0,44bc
BA14	0,51c	1,90Aa α	0,77ABbc	1,37ABab α	0,45c α
BV09	0,70c	1,53ABab α	1,30ABbc α	2,14Aa α	1,10bc
CT01a	0,56a	0,83Ba	0,46Ba	1,18ABa	0,42a
AR17	0,38	0,80B α	0,76AB	0,69B	0,53
CT01b	0,77	0,71B	0,52B	0,95B	0,60
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	0,70	0,38B α	0,76	0,79 α	0,68
BA08	0,62	0,80AB	0,82	0,73	0,61
BV15	0,67	0,76AB	0,53 α	0,90	0,69
BA14	0,63b	1,47Aa α	1,24ab	1,20ab α	1,26ab α
BV09	0,73	0,99AB α	0,53 α	0,76 α	0,90
CT01a	0,59	0,75AB	0,34	0,81	0,65
AR17	1,00	1,54Aab α	0,77a	0,71b	0,84ab
CT01b	0,72	0,54B	0,67	0,79	0,54
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	0,64	0,46 α	0,73	0,63 α	0,51
BA08	0,69	0,76	0,63	0,70	0,59
BV15	0,66	1,09	0,76 α	0,88	0,74
BA14	0,62	0,60 α	0,63	0,66 α	0,67 α
BV09	0,51	0,50 α	0,50 α	0,63 α	0,60
CT01a	0,46	0,79	0,44	0,27	0,57
AR17	0,29	0,56 α	0,46	0,86	0,74
CT01b	0,98	0,97	0,58	0,64	0,58
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	0,40	0,49 α	0,42	0,48 α	0,33
BA08	0,56	0,83	0,66	0,36	0,60
BV15	0,58	0,45	0,46 α	0,60	0,58
BA14	0,38	0,34 α	0,65	0,59 α	0,52 α
BV09	0,43	0,47 α	0,52 α	0,39 α	0,56
CT01a	0,49	0,54	0,46	0,47	0,37
AR17	0,50	0,62 α	0,39	0,52	0,69
CT01b	0,59	0,54	0,51	0,63	0,59

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

3.2.3 Umidade em volume (θ) nas tensões de 100 kPa e 300 kPa

As médias de umidade em base volumétrica (θ) nas tensões de 100 kPa e 300 kPa nas diferentes situações de estudo são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

A comparação entre posições de coleta, avaliada em cada área de cultivo e profundidade de coleta apresentou diferenças significativas em 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, tanto para umidade em volume (θ) nas tensões de 100 kPa quanto 300 kPa. Em ambos os casos, observou-se que as diferenças ocorreram para as mesmas áreas de cultivo, tanto na primeira (BV15, BA14, CT01a e CT01b), quanto na segunda profundidade (BA08 e AR17). BV06 foi a única exceção com diferenças significativa em 0,0-0,1 m, nesse caso para θ_{100} KPa.

Em ambas as umidades (θ_{100} KPa e θ_{300} kPa) constatou-se que as posições de coleta RA e/ou RB foram aquelas com maiores ($p < 0,05$) valores em relação às demais posições. Na grande maioria das vezes (7 em 13), RA apresentou os maiores valores numéricos e estatísticos ($p < 0,05$), sendo nas demais semelhantes a RB ($p > 0,05$). Quando esse comportamento não foi observado, constatou-se que EL foi o que apresentou os maiores valores de θ_{100} KPa e θ_{300} kPa, e isso esteve associado a ART17, tanto em 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m. EL, na sequência, foi a posição de coleta que numericamente apresentou menores valores, porém estatisticamente foram semelhantes a RA e/ou RB, especialmente θ_{300} kPa, a variável com maior número de casos, acontecendo também com θ_{100} KPa. Essa variável apresentou algumas áreas com valores em EL menores ($p < 0,05$) que RA e RB. Por último, as posições de coleta SA e SB foram as que apresentaram os menores valores de θ_{100} KPa e θ_{300} kPa, praticamente para todas as áreas e profundidades em que a interação foi significativa, às vezes sendo semelhantes entre si ($p > 0,05$), ou SA com os menores valores, ou SB ($p < 0,05$).

Tabela 8 - Médias de umidade em base volumétrica (θ) na tensão de 100 kPa de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	0,30ab	0,35a	0,32ab	0,36a α	0,27b
BA08	0,31	0,34a $\alpha\beta$	0,32	0,34	0,33a
BV15	0,32b	0,38ab	0,38aba α	0,40a	0,33ab
BA14	0,31b	0,40a	0,34ab	0,38aba $\alpha\beta$	0,32b
BV09	0,32	0,35	0,36a	0,35a $\alpha\beta$	0,34
CT01a	0,29b	0,36a	0,32ab	0,37a	0,30ab
AR17	0,29	0,32	0,32	0,30	0,28
CT01b	0,31a	0,36a	0,32a	0,37a	0,30a
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	0,31	0,32	0,33AB	0,34ABa $\alpha\beta$	0,29C
BA08	0,32b	0,39a α	0,28Bb	0,34ABab	0,33ABCaba α
BV15	0,33	0,35	0,33ABa $\alpha\beta$	0,34AB	0,39A
BA14	0,35	0,37	0,37A	0,41Aa	0,37AB
BV09	0,35	0,35	0,34ABa	0,37ABa	0,35ABC
CT01a	0,32	0,34	0,30AB	0,35AB	0,32ABC
AR17	0,29b	0,33ab	0,36ABa	0,31Bab	0,29Cb
CT01b	0,30	0,33	0,31AB	0,35AB	0,29BC
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	0,29	0,31	0,3	0,31a $\alpha\beta$	0,28
BA08	0,29	0,31b	0,32	0,29	0,27a
BV15	0,31	0,35	0,31a $\alpha\beta$	0,35	0,33
BA14	0,34	0,36	0,34	0,37a $\alpha\beta$	0,34
BV09	0,31	0,31	0,33a	0,31a $\alpha\beta$	0,32
CT01a	0,29	0,33	0,32	0,31	0,31
AR17	0,32	0,29	0,30	0,31	0,31
CT01b	0,32	0,35	0,31	0,31	0,33
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	0,27	0,28	0,27B	0,28b	0,30
BA08	0,28	0,31b	0,32AB	0,30	0,28a
BV15	0,32	0,32	0,30Bb	0,33	0,33
BA14	0,33	0,33	0,33AB	0,33b	0,34
BV09	0,30	0,30	0,32ABa	0,30b	0,32
CT01a	0,30	0,32	0,38A	0,33	0,32
AR17	0,32	0,31	0,30B	0,28	0,32
CT01b	0,31	0,30	0,30AB	0,31	0,30

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade.

Tabela 9 - Médias de umidade em base volumétrica (θ) na tensão de 300 kPa de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	0,26	0,29AB	0,28	0,31A	0,24
BA08	0,26	0,29B	0,28	0,29A	0,28
BV15	0,29a	0,34ABa	0,35 α	0,35Aa	0,29a
BA14	0,28b	0,37A α	0,30ab	0,35Aab α	0,29b
BV09	0,29	0,29AB	0,34	0,29A	0,30
CT01a	0,27a	0,33ABa	0,30a	0,34Aa	0,29a
AR17	0,28	0,31AB	0,31 α β	0,30A	0,26
CT01b	0,29ab	0,35AB α	0,30ab	0,35A α	0,28ab
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	0,27	0,27	0,29 AB	0,29B	0,26 B
BA08	0,27ab	0,33a	0,25Bb	0,28Bab	0,28ABab
BV15	0,30	0,32	0,31AB α β	0,31AB	0,35A
BA14	0,31	0,35 α β	0,32AB	0,38A α	0,34AB
BV09	0,31	0,29	0,31AB	0,31AB	0,30AB
CT01a	0,30	0,31	0,29AB	0,32AB	0,31AB
AR17	0,27b	0,32ab	0,35A α	0,30ABab	0,27ABb
CT01b	0,28	0,31 α β	0,29AB	0,34AB α β	0,27AB
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	0,26	0,29	0,28	0,28	0,25
BA08	0,26	0,29	0,28	0,26	0,24
BV15	0,29	0,32	0,29 β	0,32	0,31
BA14	0,29	0,32 α β	0,30	0,33 α β	0,29
BV09	0,26	0,29	0,30	0,29	0,29
CT01a	0,27	0,31	0,28	0,29	0,29
AR17	0,30	0,28	0,27 β	0,3	0,29
CT01b	0,30	0,32 α β	0,29	0,30 α β	0,31
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	0,25	0,26	0,25	0,26	0,27
BA08	0,25	0,28	0,28	0,27	0,25
BV15	0,29	0,30	0,28 β	0,30	0,31
BA14	0,28	0,29 β	0,29	0,29 β	0,29
BV09	0,26	0,28	0,29	0,27	0,28
CT01a	0,28	0,30	0,33	0,31	0,23
AR17	0,29	0,30	0,26 β	0,27	0,30
CT01b	0,29	0,28 β	0,27	0,29 β	0,28

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

Quando se avaliaram as áreas de cultivo numa mesma posição de coleta e profundidade (Tabelas 8 e 9), constatou-se que as diferenças foram observadas para as posições de coleta RA, RB, EL e SB. Na posição RA, essas diferenças ocorreram somente para θ_{300} kPa e em 0,1-0,2 m, enquanto que nas demais situações, para ambos os atributos, somente ocorreu nas profundidades de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

A área de cultivo BA14 foi a que apresentou o maior ($p < 0,05$) conteúdo de θ na tensão de 100 kPa nas posições EL e RB na camada de 0,1-0,2 m, sendo estatisticamente diferente das demais áreas (BV06, BV15, BV09, CT01a e CT01b), as quais não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) entre si, porém maiores que BA08 em EL e que AR17 em RB. Ao avaliar a θ_{300} kPa (Tabela 9), BA14 em RA e RB, em 0,0-0,1 m, e também RB em 0,1-0,2 m, foi a área de cultivo com as maiores e as menores ($p < 0,05$) umidades volumétricas, enquanto as outras áreas apresentaram valores intermediários, sendo todas semelhantes estatisticamente.

As posições de coleta EL e SB não apresentaram correspondência com RA e RB, tanto em θ_{100} KPa quanto θ_{300} kPa, nem nos casos extremos, ou seja, os maiores e menores valores ($p < 0,05$) de umidade volumétrica, como observado para os outros casos. Em SB, BV15 foi a área com maiores ($p < 0,05$) valores de θ_{100} KPa e θ_{300} kPa em 0,1-0,2 m, sendo que os menores ocorreram com AR17 e BV06 ($p < 0,05$), respectivamente. Em EL também, somente para θ_{300} kPa e 0,1-0,2 m, observaram-se dois valores extremos com diferenças significativas, porém sem coincidência das áreas de cultivos com as demais situações comentadas. Nesse caso, AR17 foi a área de cultivo com os maiores valores e BA08 com os menores ($p < 0,05$), sendo as demais situações similares estatisticamente.

A profundidade de coleta avaliada apresentou diferenças significativa para poucas áreas de cultivo e posição, mesmo assim sem haver muita correspondência entre elas, tanto para θ_{100} KPa quanto θ_{300} kPa. Na grande maioria das situações, pode ser atribuída uma relação inversa com a profundidade, ou seja, com o aumento profundidade observou-se a diminuição do volume de água no solo (θ_{100} KPa: BV15 em EL e RB em BV06; θ_{300} KPa: BA14 em RA, BV15 em EL, e BA14 e CT01b em RB). Essa diminuição é mais evidente em relação às profundidades 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m, sendo que, na primeira (0,0-0,1 m), os maiores valores nem sempre ocorrem, pois estes forma observados na segunda profundidade (0,1-0,2 m; BA14 e BA09 em RB; BA08 em RA para θ_{100} KPa e AR17 em EL para θ_{300} kPa).

3.2.4 Teores de Areia Grossa (AG), Areia Fina (AF) e Argila (ARG)

Os valores médios dos teores de areia grossa (AG), fina (AF) e argila (ARG) são apresentados na Tabela 10. No caso das classes granulométricas determinadas no solo (a classe silte não foi considerada por se tratar de uma variável estimada e não determinada em análise), os resultados foram obtidos a partir de amostras compostas das posições de coleta RA+RB e SS+SB, o que levou a designação saia (S) e rodado (R), sendo complementados por EL. As profundidades também foram alteradas em relação às propriedades discutidas até este item, sendo consideradas 0,02 m, 0,2-0,4 m e 0,4-1,0 m. Sendo assim, as análises estatísticas foram feitas considerando esta condição.

As posições de coleta em cada área de cultivo e profundidade apresentaram diferenças significativas em poucas áreas de cultivo, qualquer que tenha sido a classe granulométrica. Esse é o caso de AG em BV15 e 0-0,2 m, quando constataram-se os maiores ($p < 0,05$) valores desta fração em S, no caso 0,13 dag kg⁻¹, enquanto em EL e R, os valores de 0,12 dag kg⁻¹ e 0,11 dag kg⁻¹ foram semelhantes entre si ($p > 0,05$). Resultados semelhantes foram observados para AF nesta mesma área de cultivo, porém com a terceira profundidade (0,4-1,0 m) apresentando valores intermediários (0,10 dag kg⁻¹ em S; 0,09 dag kg⁻¹ em EL; e 0,082 dag kg⁻¹ em R). Em relação aos teores de ARG, as comparações apontaram comportamento similar para BV09 e CT01a em 0,0-0,2 m. Observou-se que as duas áreas de cultivos apresentaram os maiores ($p < 0,05$) teores de ARG em S (0,77 e 0,80 dag kg⁻¹, respectivamente), enquanto em R foram observados 0,67 e 0,74 dag kg⁻¹ e, em EL, os menores ($p < 0,05$) teores, 0,62 e 0,65 dag kg⁻¹, respectivamente. Na área de cultivo AR17 e em 0,2-0,4 m não foram constatadas diferenças significativas entre profundidades ($p > 0,05$) entre posições de coleta.

Tabela 10 - Médias de areias grossa, areia fina e argila de um Latossolo, em dag kg⁻¹, nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Areia grossa			Areia fina			Argila		
	Saia (S)	Rodado (R)	Entrelinha (EL)	Saia (S)	Rodado (R)	Entrelinha (EL)	Saia (S)	Rodado (R)	Entrelinha (EL)
Profundidade 0-0,2 m									
BV06	0,15A α	0,16A α	0,16A α	0,12A α	0,12A α	0,11A α	0,41C	0,40C β	0,40C β
BA08	0,16A α	0,18A α	0,17A α	0,12A	0,12A	0,11A	0,37C	0,27C	0,33C
BV15	0,13A $\alpha\alpha$	0,10B $\beta\alpha$	0,12B $\alpha\alpha$	0,10A $\alpha\alpha$	0,08B β	0,09A $\alpha\beta$	0,56B β	0,61B β	0,63B
BA14	0,07B α	0,065C α	0,06C α	0,05B α	0,04C α	0,03B	0,71A β	0,65A β	0,68A $\beta\beta$
BV09	0,03BC	0,04CD	0,04C	0,02C	0,04C α	0,03B	0,77A α	0,67A $\beta\beta$	0,62B $\beta\beta$
CT01a	0,03C	0,03CD	0,03C	0,03B	0,03C	0,03B	0,80A α	0,74A $\alpha\beta$	0,65B $\beta\beta$
AR17	0,03C	0,02B	0,03C	0,03B	0,03C	0,03B	0,73A	0,75A α	0,78A
CT01b	0,04BC	0,03CB	0,04C	0,03B	0,03C	0,03B	0,80A	0,71A β	0,78A
Profundidade 0,2-0,4 m									
BV06	0,14A α	0,12A β	0,13A β	0,09A β	0,10A α	0,11A α	0,47C	0,49C α	0,54B α
BA08	0,15A α	0,15A β	0,14A β	0,10A	0,11A	0,11A	0,35C	0,34D	0,39C
BV15	0,08B β	0,08B α	0,08B β	0,10A α	0,09A	0,08B α	0,64B α	0,70B α	0,61B
BA14	0,03C β	0,03C β	0,03C β	0,03B β	0,02B β	0,02C	0,81A α	0,84A α	0,83A α
BV09	0,03C	0,02C	0,02C	0,02B	0,02B α	0,02C	0,82A	0,82A $\beta\alpha$	0,82A α
CT01a	0,02C	0,03C	0,02C	0,03B	0,02B	0,02C	0,83A	0,84A α	0,86A α
AR17	0,02C	0,02C	0,02C	0,03B	0,03B	0,03C	0,82A α	0,83A $\beta\alpha\alpha$	0,86A α
CT01b	0,03C	0,03C	0,03C	0,03B	0,03B	0,04C	0,80A	0,80A $\beta\alpha$	0,73A β
Profundidade 0,4-1 m									
BV06	0,11A β	0,11A β	0,12A β	0,08A β	0,08A $\beta\beta$	0,09A β	0,50B	0,52B α	0,55B α
BA08	0,13A β	0,15A $\alpha\beta$	0,14A β	0,10A	0,11A	0,09A	0,37B	0,36C	0,39C
BV15	0,05B γ	0,05B β	0,05B γ	0,07B β	0,07B	0,06B β	0,70A α	0,74A α	0,71B
BA14	0,02B β	0,03B β	0,025B β	0,03C β	0,01C β	0,02B	0,81A α	0,83A α	0,85A α
BV09	0,02B	0,02B	0,03B	0,02C	0,02C α	0,02B	0,81A	0,83A α	0,83A α
CT01a	0,03B	0,02B	0,02B	0,02C	0,02C	0,02B	0,82A	0,84A α	0,83A α
AR17	0,02B	0,02B	0,02B	0,03C	0,03C	0,02B	0,82A	0,85A α	0,86A
CT01b	0,03B	0,03B	0,04B	0,03C	0,03C	0,03B	0,81A	0,84A α	0,79A

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

Os resultados da avaliação dos teores das classes granulométricas (AG, AF e ARG) apresentaram diferenças significativas quando a interação das áreas de cultivo na mesma posição de coleta e profundidade foi avaliada (Tabela 10). As áreas de cultivo BA08 e BV06 apresentaram-se semelhantes ($p > 0,05$) e estatisticamente superiores (AG e AF, $p < 0,05$), bem como inferiores ($p < 0,05$) (ARG – relação inversa em relação a AG e AF), quanto aos teores destas frações, em relação às outras áreas, quaisquer que sejam as posições (S, R e EL) de coleta ou profundidade (0-0,2, 0,2- a 0,4 e 0,4-1 m). Na sequência tem-se BV15, a qual apresentou teores semelhantes ($p > 0,05$), comparativamente a BA08 e BV06, porém sem um

comportamento comum entre profundidades e classes granulométricas. Todavia, essa semelhança ($p > 0,05$) ocorreu em sete frente ao total de 27 situações, o que pode ser importante para associação com outros resultados.

As demais áreas (BA14, BV09, CT01a, AR17 e CT01b) não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre si, sendo normalmente menores ($p < 0,05$) que as três áreas já comentadas. Poucos casos existiram quanto à similaridade entre BV15 e as demais áreas como, por exemplo, para AG em R e 0,0-0,1 m, AF em EL e 0,4-1,00 m e ARG em EL e 0,4-1,0 m. Entretanto, observou-se também que CT01a e AR17 apresentaram os menores teores de AG em 0,0-0,2 m, assim como com AF em S e 0,0-0,1 m, para BV09.

A comparação entre as profundidades em cada área de cultivo e posição de coleta apontou um maior número de diferenças significativas para os teores de ARG, especialmente na posição R, enquanto nas demais situações, não era esperado que tenham existido diferenças entre as profundidades em cada área de cultivo. Os teores de AG foram superiores ($p < 0,05$) nas áreas BV06, BA08, BV09 e BA14 em 0,0-0,20 m, seja em S, R ou EL, sendo que em relação a 0,2-0,4 m, os teores foram semelhantes (S: BV06 e BA08; R: BV15), $p > 0,05$) a 0,0-0,2 m, ou então inferiores ($p < 0,05$; S: BV15 e BA14; R: BV06, BA08 e BA14; EL: BV06, BA08, BV09 e BA14, $p > 0,05$) a essa profundidade. Contudo, em relação a 0,4-1,0 m, todas as áreas apresentaram AG menores ($p < 0,05$) que as duas primeiras profundidades. O comportamento observado para AG também foi constatado em AF, porém não com as mesmas áreas, mas em BV06, BV15 e BA14 em S; BV06, BA14 e BV09 em R; e BV06 e BV15 em EL. Similaridades ($p > 0,05$) e diferenças ($p < 0,05$) de médias se repetem, contudo, com menores valores de AF em profundidade, especialmente na última (0,4-1,00 m), havendo casos, porém, de semelhanças estatísticas entre médias das duas primeiras profundidades.

Os teores médios de ARG apresentaram uma relação direta com a profundidade, aumentando ($p < 0,05$) com a mesma, diferente do observado para AG e AF. Observou-se que esta fração granulométrica apresentou maior número de diferenças significativas em R (exceto BA08). Nesse caso, a primeira profundidade (0,0-0,2 m) apresentou os menores ($p < 0,05$) teores, comparativamente a 0,2-0,4 m e 0,4-1,0 m, sendo estas similares estatisticamente ($p > 0,05$). A única exceção a esse comportamento de ARG foi em AK17, a qual não apresentou diferenças significativas entre profundidades.

3.2.5 Ca²⁺ e Mg²⁺

Na Tabela 11 são apresentadas as médias dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ no solo. Os resultados da ANOVA, quando a posição de coleta foi avaliada na mesma área e profundidade, evidenciou a significância nas diversas áreas de cultivo somente na primeira profundidade (0,0-0,1 m), sendo que nas demais profundidades esta interação não foi significativa. A única exceção ocorreu em BV15 e na profundidade 0,2-0,4 m, porém, quando não foram observadas diferenças entre as médias das três posições de coleta

Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ nas áreas de cultivo BV06, BA08, BV15, BA14, BV09 e CT01a (em CT01b, somente para Mg²⁺) apresentaram o mesmo comportamento na profundidade 0-0,2 m. Constatou-se os menores ($p < 0,05$) teores, tanto de Ca²⁺ quanto de Mg²⁺ na posição de coleta S, comparativamente a R e/ou EL, as quais foram similares entre si na grande maioria das áreas citadas inicialmente. A faixa de valores observados em S para Ca²⁺ e Mg²⁺ variou de 1,18 cmol_c dm⁻³ a 8,63 cmol_c dm⁻³ e 0,45 cmol_c dm⁻³ a 1,79 cmol_c dm⁻³, em ambos os casos para as áreas de coleta BV06 e AR17, respectivamente. Das áreas de cultivo comentadas, os similares ($p > 0,05$) teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ em R e EL não ocorreram em BV15 e BV06. Em BV15, Ca²⁺ e Mg²⁺ apresentaram menores teores ($p < 0,05$) em EL, enquanto com BV06 tal comportamento somente ocorreu com Mg²⁺. Já nas áreas de cultivo AR17 e CT01b, não houve diferenças significativas para Mg²⁺ e Ca²⁺, respectivamente, a exceção dos maiores ($p < 0,05$) teores de Ca²⁺ em S, diferentemente do comportamento observado nas outras áreas de cultivo.

Tabela 11 - Médias de Ca^{2+} e Mg^{2+} , em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Ca^{2+}			Mg^{2+}		
	Saia (S)	Rodado (R)	Entrelinha (EL)	Saia (S)	Rodado (R)	Entrelinha (EL)
Profundidade 0-0,2 m						
BV06	1,18Bb	4,39aα	3,67Baα	0,45Bc	1,79Aaα	1,55Bbα
BA08	1,21Bb	4,75aα	5,08Baα	0,46Bb	1,73Aaα	2,04ABaα
BV15	3,95Bbα	6,94aα	3,54Bb	0,89Bbα	2,12Aaα	1,45Bbα
BA14	2,72Bb	5,90aα	5,66ABa	0,58Bb	1,70Aaα	1,68Baα
BV09	3,38Bbα	8,10aα	7,54ABa	1,33ABbα	2,46Aaα	2,19ABa
CT01a	2,61Bc	5,55bα	7,89Aaα	0,62Bc	1,92Abα	2,58Aaα
AR17	7,63Aaα	5,04bα	4,07Bb	1,79Aα	2,00Aα	1,57Bα
CT01b	2,99B	4,73α	4,82B	0,80Bbα	1,40Baα	1,51Baα
Profundidade 0,2-0,4 m						
BV06	1,25B	2,44α	1,61αβ	0,38	0,96β	0,69β
BA08	0,40B	2,45β	2,49β	0,13b	0,81aβ	1,01aβ
BV15	1,05ABaβ	1,04aβ	2,15a	0,28αβ	0,42β	0,54β
BA14	2,63AB	1,89β	2,11	0,46	0,60β	0,52β
BV09	2,07Aα	2,48β	2,80	0,62β	0,77β	0,90
CT01a	1,12AB	1,08β	1,17β	0,32	0,47β	0,51β
AR17	2,39Bβ	1,33β	0,64	0,69β	0,53β	0,23β
CT01b	1,03B	0,79β	0,66	0,19α	0,26β	0,26β
Profundidade 0,4-1 m						
BV06	1,04	1,22β	1,05β	0,35	0,46β	0,36β
BA08	1,07	1,59β	1,32β	0,31	0,59β	0,58β
BV15	0,75β	0,83β	0,36	0,26β	0,32β	0,12β
BA14	1,38	1,06β	0,79	0,33	0,39β	0,25β
BV09	1,01β	0,91β	1,00	0,31β	0,34β	0,36
CT01a	1,39	0,84β	0,86β	0,35	0,48β	0,45β
AR17	1,38β	0,76β	0,62	0,59β	0,35β	0,15β
CT01b	1,13	0,90β	0,68	0,20α	0,40β	0,31β

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas diversas áreas de cultivo, quando avaliados na mesma posição de coleta e profundidade, apontaram diferenças ($p < 0,05$) entre áreas para ambas as bases trocáveis, ocorreram para as três posições em 0,0-0,2 m e somente para Ca^{2+} e na posição S em 0,2-0,4 m.

Entre as áreas de cultivo, AR17 foi a única área a apresentar teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} superiores ($p < 0,05$) comparativamente às demais áreas, as quais foram similares entre si ($p > 0,05$), ressaltando novamente a faixa de variação entre áreas dos mesmos nessa posição (Ca^{2+} e Mg^{2+} variou de $1,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $8,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,45 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $1,79 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, em ambos os casos para as áreas de coleta BV06 e AR17, respectivamente) tendo sido já comentado. Na posição de coleta R, não foram observadas diferenças significativas para Ca^{2+} em 0,0-0,2 m, o que levou à similaridade entre áreas, não sendo observado o mesmo com Mg^{2+} , o qual apresentou menores ($p > 0,05$) teores em CT01b.

Nas entrelinhas (EL), as bases trocáveis, Ca^{2+} e Mg^{2+} , apresentaram comportamentos semelhantes nas áreas de cultivo BV06, BV15, CT01a e CT01b, porém não tão uniforme como observado em S e R. CT01a apresentou maiores teores ($p < 0,05$) frente às demais áreas, enquanto em BV06, BV15 e CT01b estes o foram menores ($p < 0,05$). BA08, BA14 e BV09, por sua vez, apresentaram comportamento diferenciado, pois, no primeiro caso, Ca^{2+} , os teores foram intermediários em BA14 superiores e em BV09 inferiores ($p < 0,05$), comparativamente a todas as áreas de cultivo. Por sua vez, os teores de Mg^{2+} foram superiores em BA08 e BV09 e inferiores em BA14 ($p < 0,05$). Na profundidade 0,2-0,4 m, Ca^{2+} apresentou, na posição de coleta S, os maiores teores em BV09, os menores em BV06, BA08, AR17 e CT01b, sendo as demais áreas com valores intermediários: BV15, BA14 e CT01a.

Nos casos em que as profundidades foram avaliadas na mesma área de cultivo e posição de coleta, estas foram significativas e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram maiores ($p < 0,05$) na primeira profundidade (0,0-0,2 m), enquanto nas demais (0,2-0,4 m e 0,4-1,0 m) foram menores ($p < 0,05$). As duas únicas exceções a esse comportamento estão associadas às áreas de cultivo BV09 e BV06 quando a segunda profundidade (0,2-0,4 m) apresentou teores similares de Ca^{2+} à primeira (0,0-0,1 m).

Contudo, mesmo que desdobramentos de interações tenham sido realizados, comparações de médias testadas e similaridades e diferenças identificadas, é preciso ressaltar as faixas de variação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas áreas de cultivo. Especialmente na primeira profundidade (0,0-0,2 m), estas faixas são amplas, dependendo da posição de coleta de amostras: $7,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $1,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em S; $7,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $4,39 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em R; e $7,89 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $3,54 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em EL, destacando a não correspondência entre as áreas de cultivo quanto aos maiores ou menores valores observados. Nas profundidades de 0,2-0,4 m e

0,4-1,0 m, os teores dessas bases trocáveis apresentam uma relativa maior uniformidade dos teores, especialmente a última.

3.2.6. Resistências à penetração média (RPmed), máxima (RPmax) e mínima (RPmin) e porcentagem de umidade do solo (U %) em campo

A resistência à penetração do solo foi determinada em condições de campo entre as datas de 08 a 09/11/2021, período posterior ao início das chuvas ocorridas na região, quando o solo estava com umidade que possibilitou o uso do penetrômetro digital. Duas áreas, porém, CT01a e CT01b, não puderam ser avaliadas em função da renovação das plantas com plantio, o que levou ao revolvimento de toda área a ser plantada e o preparo do solo total da área para novas plantas de novas cultivares. Esta condição levou à perda dos efeitos cumulativos, especialmente da propriedade em questão, pelo manejo adotado sobre o solo nestas áreas. Sendo assim, os resultados apresentados referem-se às áreas BV06, BA08, BV15, BA14, BV09 e AR17. Os dados também foram avaliados em intervalos de profundidade por meio de ANOVA e comparações de médias (Tabela 12, 13 e 14).

Ao avaliar a posição de coleta em cada área de cultivo e profundidade de coleta, verificou-se que a área BA14 foi a única área de cultivo a apresentar diferenças significativas em todas as profundidades avaliadas nos casos dos atributos resistência à penetração média (RPmed), mínima (RPmin) e máxima (RPmax) (Tabela 12, 13 e 14). A única exceção ocorrida com BA14 foi não ter tido diferenças significativas na profundidade 0,3-0,4 m, mais especificamente para RPmax. AR17 foi outra área de exceção, porém somente observada para a RPmax nas três primeiras profundidades e RPmin na profundidade de 0,1-0,2 m.

Nos casos em que foram observadas diferenças significativas, constatou-se os maiores ($p < 0,05$) valores em RA em todas as situações e atributos estudados, seguido de RB e EL, em alguns casos similares entre si, e os menores de SA e AB. Contudo, apesar da constatação da não existência de diferenças significativas entre as médias observadas na maioria das posições e profundidades de coleta de cada área, é evidente os maiores valores numéricos de RP nas posições RA e RB, seguido de EL, S e SB, na sequência. A única exceção a quebrar essa regra entre as situações foi o alto valor de RPmax de SA, ocorrido em BA14, nos casos de 4,07 MPa (0,0-0,1 m) e 7,05 MPa (0,1-0,2 m).

Tabela 12 - Médias de resistência à penetração média (MPa) de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	1,90A β	2,96B β	2,16 β	2,19 β	0,97 β
BA08	4,38A	2,96B	1,91	3,04	1,03 β
BV15	1,57A β	3,27AB	1,58 β	2,52 β	1,13 β
BA14	1,49Ac	6,68Aa	1,88bc γ	4,98ab	1,71bc
BV09	2,47A β	3,31ABa β	3,49	4,84	2,00 β
AR17	2,02A	3,22AB γ	1,93 β	3,68 γ	0,86 β
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	4,31ABa	4,88a	4,33a	4,92a	3,52a
BA08	5,76B	4,55	3,57	3,71	4,90a
BV15	2,61ABa β	4,44	4,19a	5,20a	2,65a β
BA14	2,75ABbc	7,14a	3,72bca β	5,79ab	2,14c
BV09	4,91ABa	4,83a	4,89	5,41	3,81a
AR17	2,03Ab	6,57aa	6,12aa	6,16aa	2,55ba
Profundidade 0,2-0,3 m					
BV06	3,72a	5,74a	3,84a	4,57a	4,25a
BA08	5,44	4,18	2,83	2,87	4,65a
BV15	3,82a	3,58	4,42a	3,64a β	3,30a
BA14	3,02b	6,89a	5,00aba	5,46ab	2,80b
BV09	3,51a β	3,97a β	3,99	4,35	4,12a
AR17	2,78b	5,12aba β	6,56aa	5,52aba β	3,26ba
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	3,71a	4,34a β	3,48a β	4,37a	4,21a
BA08	5,47	4,00	2,96	2,33	4,36a
BV15	3,49a	2,97	3,29a	3,16 β	3,93a
BA14	2,94b	6,39a	3,23ab $\beta\gamma$	4,80ab	3,26ab
BV09	3,54a β	3,05 β	3,32	4,30	3,53a β
AR17	2,68	4,30 $\beta\gamma$	5,68a	4,21 $\beta\gamma$	3,18a

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade.

Tabela 13 - Médias de resistência à penetração máxima (MPa) de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	4,22	4,49 β	3,97	5,14	3,03
BA08	5,69	5,06	3,53 $\alpha\beta$	4,77	3,60
BV15	2,77	5,50 α	3,71	5,34 $\alpha\beta$	2,20 β
BA14	2,71 bc	7,56 a	3,87 abc	6,29 ab	2,52 c
BV09	5,12 $\alpha\beta$	4,80	5,24	6,03	3,87
AR17	4,07 ab	6,92 $a\alpha\beta$	5,80 $\alpha\alpha$	6,75 $\alpha\alpha\beta$	1,77 b
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	5,45 A	5,56 $\alpha\beta$	4,89	5,52	4,53
BA08	6,21 A	5,02	5,46 α	4,57	5,56
BV15	3,46 A	4,93 $\alpha\beta$	4,84	5,75 α	3,10 $\alpha\beta$
BA14	3,19 Ab	7,47 a	4,02 ab	6,24 ab	2,51 b
BV09	7,05 $A\alpha$	5,16	5,52	6,45	4,30
AR17	2,33 Bb	7,37 $a\alpha$	7,65 $a\alpha$	7,66 $a\alpha$	3,03 b
Profundidade 02-0,3 m					
BV06	4,23	7,68 $A\alpha$	4,89 A	5,46	4,97
BA08	5,87	4,45 A	3,5B β	3,09	5,24
BV15	4,15	4,02 $A\alpha\beta$	4,98 A	4,01 $\alpha\beta$	4,33 $\alpha\beta$
BA14	3,26 b	7,03 Aa	5,42 Aab	6,25 ab	3,10 b
BV09	4,32 β	4,57 A	4,49 A	5,39	4,28
AR17	3,13 b	5,84 $Aab\alpha\beta$	7,77 $Aa\alpha$	6,36 $ab\alpha\beta$	3,45 b
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	4,36	4,65 β	3,92	4,78	4,54
BA08	5,93	4,94	3,24 $\alpha\beta$	3,02	4,70
BV15	3,64	3,20 β	3,85	3,42 β	5,07 α
BA14	3,33	6,46	3,61	5,62	3,62
BV09	3,80 β	3,44	3,56	4,74	4,15
AR17	2,79	4,73 β	6,23 α	4,80 β	3,42

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade.

Tabela 14 - Médias de resistência à penetração mínima (MPa) de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	0,10 β	0,11B β	0,21 β	0,06 β	0,03 β
BA08	2,44 β	0,06B β	0,28 β	0,07 β	0,03 β
BV15	0,05 β	0,15B β	0,07 β	0,21 β	0,03 β
BA14	0,14b β	4,78Aa β	0,07b β	2,5ab β	0,11b β
BV09	0,03 β	0,11B β	0,26 β	2,55	0,17 β
AR17	0,07 β	0,10B β	0,03 β	0,05 β	0,05 β
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	2,32 α	3,97 α	3,70 α	4,27 α	2,42 α
BA08	5,49 α	4,21 α	2,52 α	2,87 α	3,51 α
BV15	2,29 α	4,09 α	3,47 α	4,29 α	2,09 α
BA14	2,3b α	6,95a α	3,35aba	4,74aba	1,89ba β
BV09	3,13 α	4,55 α	3,55 α	3,99	2,99 α
AR17	1,76ba β	5,33a α	4,02aba	4,13aba	1,86aba β
Profundidade 02-0,3 m					
BV06	2,63 α	3,96 α	3,09 α	2,89 α	3,32 α
BA08	5,03 α	3,78 α	2,37 α	2,51 α	3,61 α
BV15	3,29 α	3,21 α	3,96 α	3,03 α	2,65 α
BA14	2,15b α	6,77a α	4,14aba	4,66aba	2,49b α
BV09	2,90 α	3,40 α	3,52 α	3,72	3,92 α
AR17	2,08 α	4,50 α	5,2 α	4,67 α	2,94 α
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	3,21 α	3,69 α	3,20 α	3,86 α	3,54 α
BA08	5,15 α	2,98 α	2,51 α	2,11 α	3,94 α
BV15	3,32 α	2,77 α	2,97 α	2,89 α	2,25 α
BA14	2,22b α	6,16a $\alpha\beta$	2,86aba	4,47aba	3,00aba
BV09	3,27 α	2,62 α	2,55 α	3,92	3,13 α
AR17	2,47 α	3,86 α	4,73 α	2,90 α	2,87 α

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

Na comparação das áreas em cada posição de coleta e profundidade, constatou-se que, quando a significância ocorreu, esta foi nas duas primeiras profundidades, tanto para RPmed ou RPmax ou RPmin, porém em diferentes posições de coleta. Em RA, observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores de RPmed e RPmin em BA14 e na profundidade 0,0-0,1 m, sendo as demais

áreas similares entre si ($p > 0,05$). SA foi outra posição que apresentou indicações de desdobramento de interações, o que foi realizado para RPmed de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m e RPmax em 0,1-0,2 m. No primeiro caso (SA em 0,0-0,1 m), AR17 apresentou os valores de RPmed que não foram diferentes estatisticamente ($p > 0,05$), enquanto na segunda profundidade, esses foram os maiores ($p < 0,05$), com BA08 tendo os menores, enquanto as demais áreas apresentaram valores intermediários. Contudo, quando se avaliou RPmax em 0,1-0,2 m, SA apresentou os menores ($p < 0,05$) valores frente as demais similares ($p > 0,05$) áreas de cultivo. A outra posição de coleta com diferenças entre valores ocorreu em EL, porém somente para RPmax e na profundidade de 0,2-0,3 m, quando observou-se que BA08 foi a área de cultivo com menores ($p < 0,05$) valores de RPmax, comparativamente as outras áreas de cultivo, todas similares entre si ($p > 0,05$). Todas as outras situações não relatadas para essa interação não foram significativas, o que não levou ao seu desdobramento e comparações.

Verificou-se a necessidade de desdobramento para praticamente todas as situações de estudo da interação da profundidade na mesma área de cultivo e posição de coleta, especialmente para RPmed e RPmin, sendo que para RPmax o número de significâncias ($p < 0,05$, Teste F) da interação foi bem menor. Observou-se, na primeira profundidade, os menores ($p < 0,05$) valores dos atributos avaliados comparativamente às demais, as quais em sua grande maioria foram similares ($p > 0,05$). Nas posições de coleta RA e RB constatou-se a diminuição dos valores de RPmed e RPmax na última profundidade (0,3-0,4 m) para aqueles casos (BV06, BV09, AR17 e BV06) em que a interação foi significativa, refletindo o aumento da RP nas camadas intermediárias.

Na Figura 8 é apresentado o comportamento da RPmed, medida em campo em todas as áreas agrícolas e posições de coleta, a cada centímetro.

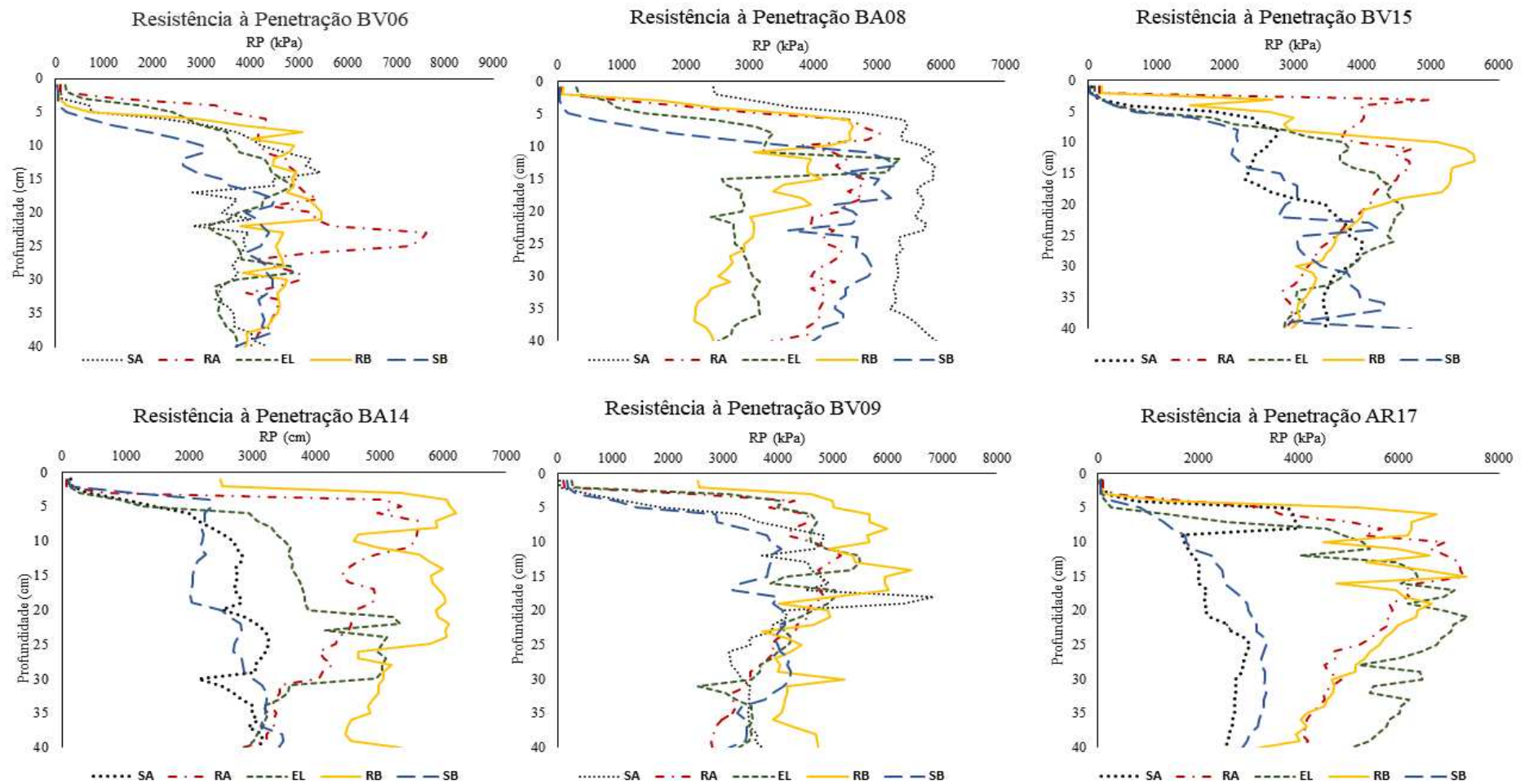


Figura 8. Resistência à penetração média de um Latossolo (RP_{med} , em kPa) medida no campo nas posições de coleta sob a planta (saías alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

A umidade do solo em amostras coletadas no dia da determinação da RP em campo foi também avaliada estatisticamente. Inicialmente, pela interação que compara as posições de coleta em cada profundidade e área de cultivo, tendo sido constatado que os maiores ou menores teores de umidade não apresentam um comportamento padrão, ocorrendo indiscriminadamente nas diferentes posições de coleta. Houve áreas em que mesmo que as interações não foram significativas e casos também de terem sido, porém sem apresentar diferenças significativas nas comparações de médias (BV06 foi uma dessas áreas). Contudo, o maior número de interações significativas e que levou ao desdobramento da interação ocorreu na primeira e segunda profundidades. BA14 foi a única área em que a significância não existiu em 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, enquanto em 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m, BV06 e BV15 passaram a integrar com BA14, as áreas que não apresentaram significância das interações.

Na comparação dos valores médios de umidade do solo ao desdobrar a interação entre área de cultivo na posição de coleta e profundidade, constatou-se que os maiores percentuais ($p < 0,05$) ocorrem em BA14 em todas as profundidades avaliadas, sendo seguido por BV15 (Tabela 15). Esta área (BV15) apresentou valores de umidade semelhantes ($p > 0,05$) a BA14 nas posições de coleta SA e RA. Nas outras posições de coleta (EL, RB e SB), os valores de umidade de BV15 foram inferiores ($p < 0,05$) a BA14, porém superiores ($p < 0,05$) às outras áreas. Os resultados obtidos apontam ainda que BV06 e BA08 foram as áreas com menores ($p < 0,05$) porcentagens de umidade do solo e à BV09 e AR17 pode se associar valores de umidade intermediários de umidade do solo, quaisquer que sejam as posições e profundidades de coleta.

A umidade do solo apresentou variações em poucas situações quando avaliaram-se as profundidades nas áreas de cultivo e posição de coleta, o que aconteceu com as áreas BV15 e AR17 em RA, BV15 em EL e BV06 e AR17 em SB. Nos dois primeiros casos, RA e EL, constatou-se que os teores de umidade foram menores ($p < 0,05$) em 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, comparativamente às duas subjacentes (0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m), sendo similares ($p > 0,05$) entre si em cada uma das áreas envolvidas. Em SB tem-se duas situações distintas entre si e em relação às já relatadas, pois em BV06, as porcentagens similares ($p > 0,05$) de umidade das três primeiras profundidades foram maiores ($p < 0,05$) em relação a última (0,3-0,4 m). Já em AR17, as porcentagens de umidade do solo não foram diferentes entre si, o que reflete médias semelhantes estatisticamente em profundidade.

Em todas as outras situações, as interações envolvendo profundidades nas mesmas áreas de cultivo e posições de coleta não se apresentaram significativas ($p > 0,05$), não tendo sido

desdobradas, o que reflete a semelhança entre porcentagens das profundidades avaliadas nas diferentes situações de áreas de cultivo e posição de coleta.

Tabela 15 - Médias de umidade (%) de um Latossolo nas posições de coleta sob a planta (saia alta - SA e baixa - SB), no local de tráfego das rodas (rodados alto - RA e baixo - RB) e nas entrelinhas das plantas (EL) em áreas de cultivo de café na Fazenda Chuá, Patos de Minas- MG

Área de cultivo	Posição de coleta				
	Saia alta (SA)	Rodado alto (RA)	Entrelinha (EL)	Rodado baixo (RB)	Saia baixa (SB)
Profundidade 0-0,1 m					
BV06	15,43Ba	18,51 B a	18,52 B a	16,78Ca	19,05CDa α
BA08	15,91Bb	17,76Bab	19,60Ba	19,71BCa	15,62Db
BV15	24,41Aab	23,34Ab β	21,26Bb β	27,17ABa	27,07ABa
BA14	28,93A	27,32A	26,19A	27,77A	29,07A
BV09	24,97Aa	23,87Aab	22,45ABab	22,78Bab	21,02Cb
AR17	25,66Aa	17,98Bc β	20,39Bbc	21,42Cbc	22,99BCab α
Profundidade 0,1-0,2 m					
BV06	15,43Ba	18,51Ba	18,52Ba	16,78Ca	19,05CDa α
BA08	15,91Bb	17,76Bab	19,60Ba	19,71BCa	15,62Db
BV15	24,41Aab	23,34Ab β	21,26Bb β	27,17ABa	27,07ABa
BA14	28,93A	27,32A	26,19A	27,77A	29,07A
BV09	24,97Aa	23,87Aab	22,45ABab	22,78Bab	21,02Cb
AR17	25,66Aa	17,98Bc β	20,39Bbc	21,42Cbc	22,99BCab α
Profundidade 02-0,3 m					
BV06	16,56B	18,71C	18,62C	16,83D	15,87C β
BA08	16,08Ba	18,03Ca	19,46BCa	18,85Da	15,96Ca
BV15	24,62Aab	26,54Aab α	24,20ABb α	28,05ABa	27,29Aab
BA14	27,61A	27,32A	27,40A	29,53A	29,90A
BV09	24,53A	25,14AB	23,88AB	24,25BC	22,44B
AR17	25,18Aa	20,75BCb α	21,25BCb	21,23Cdb	25,19Ab α
Profundidade 0,3-0,4 m					
BV06	16,56B	18,71C	18,62C	16,83D	15,87C β
BA08	16,08Ba	18,03Ca	19,46BCa	18,85Da	15,96Ca
BV15	24,62Aab	26,54Aab α	24,20ABb α	28,05ABa	27,29Aab
BA14	27,61A	27,32A	27,40A	29,53A	29,90A
BV09	24,53A	25,14AB	23,88AB	24,25BC	22,44B
AR17	25,18Aa	20,75BCb α	21,25BCb	21,23Cdb	25,19Ab α

Médias seguidas de letras maiúsculas comparam as áreas numa mesma profundidade e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza escuro); letras minúsculas comparam as posições numa mesma área e profundidade (exemplo: hachurado cinza intermediária); e letras do alfabeto grego comparam as profundidades na mesma área de cultivo e posição de coleta (exemplo: hachurado cinza claro), quando letras são semelhantes, as médias não se diferem entre si pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade

3.2.7. Descrição qualitativa dos radargramas

Os radargramas obtidos de um transecto utilizando a antena de 400 MHz não apresentaram uma boa resolução que permitisse a identificação de camadas mais adensadas ou variações nos componentes granulométricos no solo. Provavelmente, tais resultados podem ser associados às condições de solo locais: trata-se de um Latossolo Vermelho-Amarelo, caracteristicamente de perfil profundo com horizonte B latossólico (Bw) muito homogêneo estruturalmente, em algumas áreas de cultivo com teores de argila maiores que 70% e, na época da coleta dos dados, com teores de umidade baixa, visto ainda não ter iniciado a estação chuvosa naquela época (mês de julho).

Os radargramas obtidos com a antena de frequência de 900 MHz apresentaram uma melhor resolução sendo, portanto, utilizados na comparação e identificação da variabilidade estrutural no subsolo. Estes dados foram obtidos em 08 e 09 de novembro do 2021.

Das oito áreas de cultivo selecionadas inicialmente, foram obtidos seis radargramas, correspondentes às áreas de cultivo BV06, BA08, BV15, BA14, BV09 e AR17. As áreas CT01a e CT01b não foram avaliadas por terem sido recentemente renovadas tendo sido revolvidas em área total para o replantio de plantas de café, inviabilizando a avaliação das alterações físicas no solo. Nas áreas avaliadas, o GPR foi utilizado considerando transectos de 16 metros de comprimento aproximadamente, abrangendo cinco linhas de plantas de café e quatro entrelinhas. Os dados coletados foram processados e selecionaram-se os radargramas das áreas de cultivo BA14 (Figura 9) e AR17 (Figura 10). Estas áreas de cultivo foram selecionadas por terem apresentado valores altos da RP_{med} e RP_{max} tanto nas avaliações feitas em laboratório (Tabelas 5 e 6) quanto no campo (Tabelas 11 e 12) como nas posições RA, RB e EL, de tal forma a viabilizar a identificação de mudanças e/ou de padrões que possam dar indícios de compactação em subsuperfície,

A profundidade máxima do radargrama é dada pela linha verde em ambas as áreas na Figura 9 e Figura 10, a partir dessa profundidade o radargrama não apresenta dados confiáveis em relação a valores de constante dielétrica (k) e resolução, podendo ser considerada inadequada para os propósitos desse estudo e as condições de cultivo do café: irrigado com sistema radicular limitado pela disponibilidade de água. Observou-se alterações na estrutura do solo nas distâncias de 0, 4, 8, 12 e 16 metros no comprimento com forma de cone invertido ressaltado por uma linha ponteadada que chega até uma profundidade de 0,8 m aproximadamente (Figura 9) na área de cultivo BA14. Tais distorções na imagem podem ser associadas ao sistema

radicular do cafeeiro pois é uma área plantada em 2008 e esse sistema encontra-se mais desenvolvido do que na área AR17 plantada no ano de 2017.

Nas distâncias de 2, 6, 10 e 14 metros no transectos das áreas de cultivo BA14 constatou-se maior homogeneidade, destacando-se, até 0,2 m de profundidade, um aumento no contraste no radargrama em todo o comprimento, seguido da diminuição da intensidade das cores, atingindo 0,65 m de profundidade.

A Figura 10 apresenta o radargrama para a área de cultivo AR17. Observou-se um perfil homogêneo, onde não se diferencia alterações na estrutura do solo pelo efeito das raízes, isso pelo fato de ser uma área plantada no ano de 2017 onde o solo ainda está reacomodando-se, com maior contraste nos primeiros 0,2 m de profundidade, o que diminui até 0,65 m de profundidade, seguido de aumento de 0,65 a 1 m. O perfil AR17 apresenta uma resolução maior quando comparado com o perfil BA14.

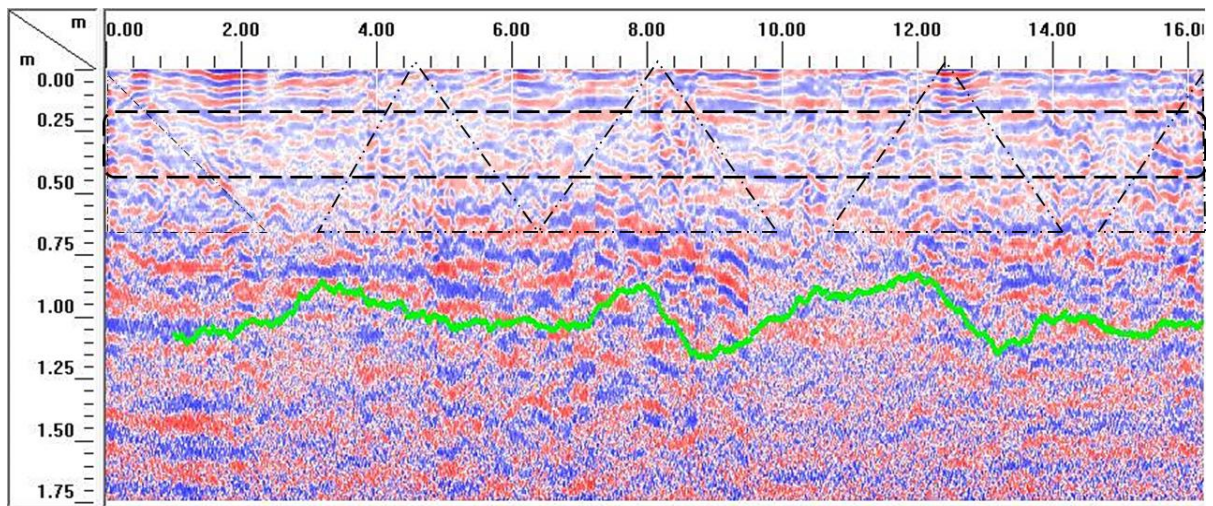


Figura 9. Radargrama da área BA14 obtido com antena de 900 MHz, triângulo pontilhado indica alterações na estrutura de um Latossolo. Linha verde: profundidade de leitura confiável.

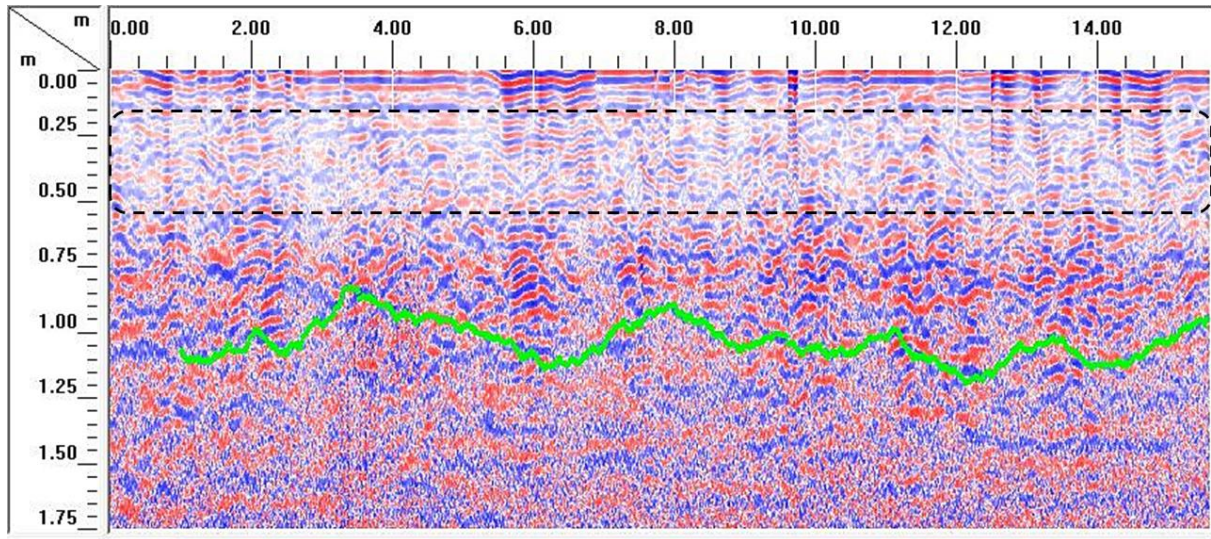


Figura 10. Radargrama da área AR17 obtido com antena de 900 MHz. Área pontilhada: cambio de contraste. Linha verde: profundidade de leitura confiável.

4. Discussão

O solo é um sistema complexo que apresenta grande número de atributos. Relacionar a ocorrência e o comportamento desses atributos com a agricultura, eleva a complexidade das análises por meio dos métodos estatísticos univariados (SILVA et al., 2015). A análise de componentes principais mostrou-se útil para classificar atributos do solo visando identificar os que melhor descrevessem sua variabilidade. Na PCA final (Quadro 4) o componente principal 1 (CP1) agrupou os atributos físicos com maiores escores ($\geq 0,7$), no componente principal 2 (CP2), o grupo de atributos foram aqueles constituídos pelos atributos texturais, enquanto no terceiro (CP3), constatou-se os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Dessa forma, a análise indica que dos atributos do solo avaliados, os que melhor descreveram a variabilidade das áreas na área estudada são os físicos, conforme descrito por Silva et al. (2015). A correlação inversa entre PT e RPmed, RPmax, θ_{100} e θ_{300} kPa indica que enquanto o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui (CARVALHO, 2013). O contraste entre RPmed, RPmax e RPmin e PT pode ser tomado como uma medida geral de compactação do solo, já que se caracteriza entre outros, por um aumento da RP e diminuição no volume de poros (CORTEZ et al., 2011), resultados também observados por Lima; Silva e Raminelli (2013).

4.1 Análise de componentes principais

A dispersão gráfica apresentada na Figura 4 indicam que que Dp, AF e ARG são explicadas majoritariamente pelo CP2, enquanto aos demais atributos pelo CP1. Percebe-se que há uma sobreposição das áreas BV06 e BA08, o que pode ser devido à semelhança que os solos

dessas áreas possuem em relação à granulometria. Este fato pode ser associado ao relevo declivoso onde estas duas áreas estão localizadas, visto que há maior eluviação de argila (BURAK; PASSOS; SARNAGLIA, 2010).

De maneira geral as oito áreas possuem o mesmo comportamento quando comparadas em relação às posições de coleta do solo. RA, RB e EL situam-se no mesmo quadrante indicando similaridade quanto aos valores de RP_{med} , RP_{max} , RP_{min} , θ 100kPa e θ 300kPa (Figura 4), o que pode ser explicado pelo constante tráfego de maquinário para tratos culturais, especialmente RA e RB (SANTINATO et al., 2018). Estes valores são maiores quando comparados com as posições SA e SB, os quais apresentaram uma relação inversa com PT.

Ao analisar a profundidade 0,1-0,2 m (Figura 5) observou-se um comportamento similar com a primeira profundidade (0,0-0,1 m, Figura 4). As posições de coleta RA, RB e EL apresentaram a mesma similaridade enquanto à localização no quadrante, estando afastadas das posições SA e SB. A distância entre esses dois grupos tende a diminuir em comparação à Figura 4, pois com o aumento da profundidade, a PT tende a ter menor alteração com a influência do tráfego de máquinas e implementos e possível compactação (MARTINS et al., 2012), (MAIA, 2016), (MASOLA, 2020). Contudo, mesmo que os valores desses atributos sejam menos alterados, este efeito ainda é discriminado pela PCA. O comportamento observado para PT e comentado anteriormente pode ser também aplicado aos atributos RP_{med} , RP_{max} e RP_{min} , os quais tendem a diminuir, a exceção da área BA14 cujos valores desses atributos foram maiores. No entanto, as áreas BV06 e BA08 da Figura 5 continuam separadas das demais, o que pode ser associado aos teores de AF e Dp (Figura 4).

Na Figura 6, correspondente à profundidade 0,2-0,3 m, as oito áreas e suas respectivas posições de coleta apresentaram forte tendência de agrupar à esquerda da PCA, indicando diminuição dos valores de RP_{med} , RP_{max} e RP_{min} , com exceção da área BA14 nas posições de coleta RA e RB que continua tendo valores altos. A diminuição da resistência à penetração e teor de umidade (θ) nas tensões de 100 e 300 kPa, na profundidade 0,2-0,3 m, pode ser explicada, novamente, pela pouca influência do tráfego de maquinários nesta profundidade, menor quando comparadas às camadas superficiais. A PT apresentou valores similares nas cinco posições de coleta na profundidade de 0,2-0,3 m, com a mesma tendência ao analisar a profundidade 0,3-0,4 m (Figura 7).

Cabe ressaltar que a dispersão gráfica das áreas em relação ao CP2 para as quatro profundidades (Figuras 4, 5, 6 e 7) apresentou a mesma distribuição, indicando que as

características intrínsecas do solo, como D_p , AF e ARG, não apresentaram grande variabilidade, como constatado por Burak et al. (2012) As áreas BV06 e BA08 agruparam-se em função dos maiores teores de areias grossa e fina, enquanto as áreas BV09, BA14, AR17, CT01a e CT01b com os menores conteúdos de areia e a área BV15 como intermediara entre os dois grupos mencionados.

4.2 Atributos físicos

A porosidade total (PT) apresentou relação inversa com as RP_{med} , RP_{max} e RP_{min} . Nas áreas BA14 e CT01a, que possuem o maior volume de poros nas SA e SB, responderam com os menores valores de RP_{med} e RP_{max} , como também os menores conteúdos de θ nas tensões de 100 e 300 kPa nessas posições, medidas comparadas na camada de 0-0,1 m no sentido de posição em mesmo nível de área e profundidade.

Os menores volumes ($m^3 m^{-3}$) de PT foram para as posições RA e RB contrastando com maiores valores de RP_{med} e RP_{max} . Apesar da análise de macroporosidade não ter sido selecionada na PCA, os seus resultados também contribuem para a explicação do fenômeno. Valores de PT de 0,017 e 0,005 $m^3 m^{-3}$ nas posições de linha de tráfego (RA e RB) na área BA14 indicam prováveis limitações na aeração do solo em épocas mais úmidas, sendo muito menor que a porosidade de aeração ideal para o crescimento satisfatório do sistema radicular da maioria das plantas (0,10 $m^3 m^{-3}$), conforme relatado por Päivänen (1973), Kiehl (1979), Gupta et al. (1987), Theodorum (1991), Tormena et al. (1998) e Pagliai et al. (2003), e para cafeeiro cultivado sobre um Latossolo Roxo de 0,152 a 0,163 $m^3 m^{-3}$ (GOULARTE, 2014) e de 0,12 e 0,13 $m^3 m^{-3}$ para cafeeiro conilon (SOUZA; DAN; ARAÚJO, 2016). No entanto, esse valor é apenas uma referência pois a taxa de difusão gasosa do solo depende da profundidade e densidade do sistema radicular, temperatura do solo, tortuosidade do espaço poroso dentre outros (VAN LIER, 2010), sendo a determinação dos limites mínimos da porosidade de aeração para o cafeeiro complexa.

Em contraste às posições de RA e RB, no geral, para SA e SB, os volumes de macroporos estiveram perto dos valores acima citados (0,15 e 0,14 $m^3 m^{-3}$), concluindo que nas posições que compreendem a área das saias não apresentam risco de perda das raízes por asfixia. Neste sentido, Feng et al. (2002) comentam que, para solos argilosos, valores de 0,1 $m^3 m^{-3}$ começam a causar inibição ao suprimento adequado de O_2 às plantas, sendo necessário volumes maiores que 0,1 de porosidade de aeração.

A queda na porosidade de aeração nos rodados pode se explicar pela pressão exercida pelo tráfego dos maquinários nos tratos culturais na área.

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) alto ($>0,8$) e o bom desenvolvimento de cafeeiro na área BA14, embora apresente baixa porosidade de aeração nos rodados, pode ser associado ao fato de que as raízes não ultrapassavam (observação visual de campo) a região das saias em busca de água e nutrientes nas profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m). Nas posições SA e SB, a porosidade de aeração ($0,15$ e $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) não está comprometendo as trocas gasosas das raízes. Por outro lado, apesar da diminuição da PT, foram as posições que apresentaram o maior conteúdo de θ nas tensões de 100 e 300 kPa, confirmando a relação inversa mostrada na PCA entre PT e os demais atributos físicos do CPI.

As alterações causadas à estrutura do solo, como a redução da PT, e as diferenças entre as posições quanto a este parâmetro, menores em RA e RB, podem provocar o colapso dos poros de tamanhos maiores. Inicialmente, há a diminuição do tamanho dos poros, aumentando consequentemente o volume de poros menores (microporos), os quais promovem a retenção de água em tensões maiores (GONTIJO et al., 2008). Tal condição pode ser associado ao fato de que as áreas com os menores valores de PT sejam justamente as que retém mais água (θ) nas tensões de 100 e 300 kPa. Mesmo padrão evidenciou-se na área BA14 na camada 0,1-0,2 m.

Para a área AR17 não houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os valores de PT nas posições avaliadas em nenhuma das profundidades. Esses resultados indicam que esse atributo não foi apropriado para quantificar e avaliar o efeito do manejo da cultura sobre a estrutura do solo (MARTINS et al., 2012b), o que provavelmente pode ser devido ao fato do curto tempo de estabelecimento da cultivar nessa área (Tabela 1). A área AR17 foi instalada em novembro de 2017, cerca de 3,5 anos antes da coleta das amostras de solo. A preparação do solo para o plantio, incluiu a subsolagem da área, aração e gradagem da área total. Dessa forma, foi levantada a hipótese que o período curto ainda não foi suficiente para que as primeiras modificações na estrutura aparecessem, apesar de os números já apresentarem uma tendência de diminuição da PT nos rodados da área, as quais, segundo observado por Machado et al. (1981), podem ter iniciado após o quarto ano após o plantio.

A área BA08 apresenta uma declividade em torno de 8% e, como mostra as Tabelas 10 e 11, o conteúdo de AG e AF é substancialmente maior nas primeiras camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m em comparação às áreas BA14, BV09, CT01a, AR17 e CT01b, podendo ser o responsável pelos maiores valores na PT pelo efeito da presença de partículas de tamanho areia (2,0 a 0,053

mm). A presença de partículas mais grosseiras no solo, de tamanho areia ou superiores, dificulta a compactação porque dificulta o arranjo das partículas (NADERI-BOLDAJI et al., 2016).

Na área CT01b, plantada no ano 2001, observou-se a presença de petroplintitas e plintitas, com diâmetros que variando entre 0,5 a 2 cm, dando à textura a condição de cascalhenta subsuperficialmente, contínuo ou fragmentado, por onde permeiam pequenas quantidades de solo (KER; SCHAEFER, 1995; KER, 1997). A condição de uma partícula mais grosseira no perfil, gerada pela presença das pequenas concreções ferruginosas, leva a um efeito parecido da área BA08. A referida área também, por ser antiga, plantada em 2008, apresenta sistema radicular do café bem desenvolvido, com acúmulo de matéria orgânica nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m de 8,75 % e 7,96 %, determinado a partir do teor de COT (5,08 e 4,62 dag kg⁻¹) nas posições RA e RB, funcionando como um amortecedor das partículas do solo, sendo mais um fator que contribui para dificultar ou amenizar a compactação (NADERI-BOLDAJI et al., 2016).

Em contraste, para RA e RB, a área BA14 difere das áreas anteriormente citadas com o menor valor de PT. Essa diminuição, além de ser atribuída ao tráfego de máquinas em RA e RB, pode ter contribuição de outros elementos, como o baixo teor de areias (11% para as duas posições e na camada de 0-0,2 m e 5,3 % na camada de 0,2-0,4 m), embora apresente conteúdos de matéria orgânica de 9,53 e 4,39 % para as camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m respectivamente. Cabe ressaltar que, o NDVI calculado na etapa de pré-seleção das áreas (Figura 1), a BA14 foi escolhida por apresentar um dos índices de alto vigor ($NDVI \geq 0,8$) com o objetivo de identificar quais possíveis atributos ou características no solo poderiam influenciar o bom desenvolvimento da cultura. Para a área BA14, o NDVI contrariou os dados de qualidade física, que mostraram a menor PT e os maiores valores de RPmed e RPmax quando comparadas com as demais áreas, inferindo que nas posições RA e RB, BA14 apresenta compactação (MAIA, 2016), também demonstrado pelos valores de porosidade de aeração dessas camadas.

A área BA14 também apresentou alta produção na última safra (2020/2021), com produtividade de 82,56 sacas ha⁻¹, tendo como média no biênio (safra 2019/2020 e 2020/2021), a produção média de 41,28 sacas ha⁻¹, uma vez que após a colheita da safra de 2018/2019, as plantas foram esqueletadas, não apresentando produção no ano de 2020. A cultivar Bourbon Amarelo presente na área BV14 é reconhecida pela alta qualidade da bebida e pela maturação precoce dos frutos (FAZUOLI et al., 2005), como também por apresentar um sistema radicular pouco agressivo, sendo utilizada com sucesso quando há irrigação.

No presente caso, há irrigação localizada via gotejamento, e, em análise das trincheiras abertas, nas áreas onde a cultivar era Bourbon (BV06, BA08, BV15, BA14 e BV09), foi observado que o sistema radicular estava contido na projeção da copa da planta, com grande presença superficial de raízes finas, não avançando para a linha de rodados. Foi observado também que, em comparação ao AR17, CT01a e CT01b, as raízes eram menos profundas. Apesar da área com a variedade Arara (AR17) ser a mais jovem de plantio e com o café de menor porte, o sistema radicular desta explorava maior volume de solos do que as variedades de Bourbon.

Como as raízes das cultivares de Bourbon eram mais superficiais, e a demanda por água e nutrientes era atendida via irrigação por gotejamento e adubação a lanço, o sistema radicular mais superficial foi mais eficiente para aproveitar a irrigação e a fertilização, pois a sua área de absorção estava mais próxima em comparação às demais cultivares. Tal hipótese é válida para as áreas BA14 e BV09, que se encontram em relevo plano, com solo argiloso. As demais cultivares de Bourbon estão em áreas com alguma declividade, e com maior presença de areias, fato que favorece o escoamento superficial e subsuperficial de água, bem como a erosão de partículas de solo e carreamento de nutrientes. Essa observação pode ajudar a entender a razão pela qual, apesar de apresentar, segundo as análises realizadas, pior qualidade física do solo, as plantas apresentavam alto vigor e boa produtividade. Outro fator que pode explicar os altos índices de NDVI é o manejo de renovação da lavoura. O talhão de BA14 foi esqueletado, prática que consiste em cortar os ramos plagiotrópicos, no ano de 2019, proporcionando renovação das folhas e ramos produtivos, melhorando o aspecto das folhas e o seu desenvolvimento vegetativo.

Os valores de RPmax, observados nas posições RA e RB nas áreas BV06, BA08, BA14, BV09 e CT01a na camada 0-0,1m estão associados ao efeito resultante do tráfego de máquinas tanto para a colheita como para a condução da cultura, como aplicação de defensivos agrícolas e adubação, uma vez que os dados na EL e SA e SB não acompanham o mesmo comportamento. Segundo Palma et al. (2013) foram observadas alterações na resistência do solo à penetração na linha de tráfego de café mecanizado até a profundidade de 15 cm. Bergamin et al. (2010) reportaram alterações na RP do solo no sistema de semeadura direta até 0,1 m de profundidade submetido ao tráfego de máquinas. Os resultados de RPmed e RPmax na comparação das áreas no mesmo nível de posição e profundidade, apresentaram para a área BA14 os maiores valores dos dois atributos entre todas as SA nas profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m e entre os RBs na

camada de 0,2-0,3 m. Em contraste, AR17 apresentou as menores médias nas mesmas posições e profundidades dentre as oito áreas.

As áreas BA14 e AR17 localizam-se numa altitude de 1080 m, em locais planos, a uma distância de 645 m uma da outra, sendo os teores de argila foram similares nas camadas de 0,2-0,4 e 0,4-1 m (≥ 80). Contudo, diferiram em valores de PT sendo que as maiores médias para a área AR17 foram $0,6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ até a profundidade de 0,4 m e de $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a área BA14, evidenciando uma redução na macroporosidade com valores de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para AR17 e $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para BA14 aumentando consequentemente a microporosidade. Essas diferenças, principalmente a redução dos macroporos deveu-se ao colapso da estrutura do solo pelo efeito da carga aplicada nas operações mecanizadas nas posições RA e RB, quando comparados com as SA e SB, corroborando os dados obtidos por Lipiec et al. (2003), Yavuzcan et al. (2005), Gontijo et al. (2008), Carmo et al. (2011) e Palma et al. (2013). Os baixos valores de macroporosidade da área BA14 são inferiores ao que seria ideal para porosidade de aeração do solo ($0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Os menores valores de RPmed, RPmax da área AR17 na maioria das posições de coleta, semelhantes estatisticamente, podem ser explicados pelo fato da área ter sido plantada no ano de 2017, quando o solo é revolvido nos tratos pré-plantio. Tal condição levou os agregados a uma fase de acomodação, o qual persiste quatro anos depois, sem apresentar um efeito marcado no aumento da resistência à penetração e diminuição da porosidade total. Segundo Machado et al. (1981), essas alterações manifestam-se a partir do quarto ano e agravam-se após o oitavo ano consecutivo do plantio, embora pode-se perceber nas médias numéricas uma tendência na alteração dos valores desses atributos físicos do solo.

Martins (2009) sinaliza que dentre os atributos físicos, a RP, não foi apropriada para quantificar o efeito do manejo sobre a estrutura do solo provavelmente pelo curto tempo de estabelecimento da lavoura, Espera-se que com o decorrer do tempo haja maior alteração das propriedades físicas quando o café é manejado com mecanização, o que também é esperado por Carmo et al. (2011) para plantios de café mecanizados, fato observado na área AR17 plantada no ano 2017.

Apesar de ser uma das áreas com os índices de NDVI mais altos ($>0,8$), a área BA14 apresentou os maiores valores de RPmax, especialmente na camada 0-0,1 m, quando comparadas as demais áreas, para os dados obtidos em ensaios de laboratório e confirmados com as medições feitas em campo de RP (Figura 8) e umidade (Tabela 15). Esperava-se na área

BV14 que, por apresentar maiores valores de RP_{med} e RP_{max} , esses fossem limitantes para a cultura, no entanto. Gontijo et al. (2008) destacam que os locais onde há menor espaço poroso tendem a apresentar menor conteúdo de água volumétrico em baixas tensões e maior teor (θ) em tensões superiores a 6kPa, proporcionando acréscimo na retenção de água, aumentando a umidade residual. Esse fato é explicado pelo aumento do potencial matricial de superfície causado pela compressão do solo e que a sua vez aumenta os pontos de contato entre as partículas e, conseqüentemente, a adsorção da água (ASSOULINE et al., 1997).

Com a maior quantidade de microporos nas posições RA e RB em relação aos locais não alterados pelo processo de compactação (posições SA, SB e EL), de acordo com Resende et al. (2007), a compactação do solo poderia ser benéfica em termos de retenção de água no caso dos para Latossolos com estrutura tipo “pó-de-café”. Dentro de certos limites, tal condição levaria a transformação de parte dos macroporos em microporos, favorecendo a maior retenção de água. Dessa forma pode-se explicar a relação direta entre a RP_{med} e RP_{max} e os teores de água (θ) nas tensões de 100 e 300 kPa. No entanto, quando se discute o benefício para a retenção de água em tensões mais altas, é importante analisar os demais atributos, como os volumes de macroporos e a porosidade de aeração, que no caso das posições de

RA e RB, em sua maioria, são incondizentes com as necessidades das culturas.

Ao observar os dados da classificação textural (Tabela 10), as áreas BA08, BV06 e BV15 apresentaram os maiores teores de areia no perfil geral diferenciando-se das demais áreas (BA14, BV09, CT01a, AR17 e CT01b). A área BA08 mostrou-se mais arenosa em relação às BV06 e BV15, quando comparadas as posições e profundidades e a sua vez com os menores teores de argila (Tabela 10), relação inversa observada na PCA para o CP2. De acordo com os dados de altitude, as áreas BA08 e BV06 encontram-se nas menores altitudes e com as maiores declividades, especialmente BA08, com declividade próxima a 8%.

Os maiores conteúdos de areia e menores de argila pode dever-se ao efeito do relevo e eventos intensos de precipitações, levando à erosão de partículas mais finas, como também à geologia do local, que segundo levantamentos da CODEMIG; CPRM (2013), sendo as áreas BA08, BV06 e BV15 a transição com domínios geológicos de rochas mais ácidas, e as demais áreas se encontraram em áreas com solos desenvolvidos a partir de magmatismo máfico. Desta forma, a diferença textural nas áreas podem ser atribuídas a uma situação de declividade, regime hídrico e ao material de origem (MOTTA et al., 2002)

Os atributos texturais não são adequados para a identificação de compactação, embora as áreas com maiores teores de areia apresentem baixos valores de RPmed em comparação com a área BA14, demonstrando que a textura interfere diretamente na compressão do solo, podendo contribuir ou interferir na propagação dos impactos. Esses valores não diferem ($p < 0,05$) com outras áreas que apresentam altos teores de argila ($> 70\%$) como as áreas BV09, CT01a, CT01b e AR17.

Os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVIs) das áreas BA08, BV06 e BV15 encontraram-se na faixa de 0,58 até 0,72, considerados baixos neste estudo, em contraste aos maiores valores das áreas BA14 e BA09 ($> 0,8$). Apesar de ser a mesma cultivar, com poucas diferenças principalmente na variação da cor do grão e o ano de plantio, a discrepância nos NDVIs pode estar associada à granulometria da área (Tabela 2) e sua relação com o conteúdo de água. A disponibilidade de água para a planta é influenciada pela textura argilosa e conteúdo de matéria orgânica (TORMENA, SILVA, LIBARDI, 1998; ARAUJO-JUNIOR et al., 2011; SILVA et al., 2014). Ao medir os conteúdos de umidade em campo (Tabela 15) para BA08, BV06 e BV15 foi menor nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, quando comparadas com o restante das áreas, confirmando a relação inversa entre a retenção de água e o teor de areia (CENTENO et al., 2017).

A baixa capacidade de armazenamento de água nessas áreas pode ser explicada pela sua granulometria, pois BA08 e BV06 classificaram-se como de textura franco argilosas e muito argilosas, respectivamente, condição que pode causar estresse hídrico na planta em épocas de baixas precipitações. Sales et al., (2016), demonstrou baixa capacidade de armazenamento de água em um solo Latossolo de textura média quando comparado com um Argissolo, com maiores teores nas tensões de 0,01 e 0,03 Mpa corroborando a influência da textura no armazenamento de água no solo como nas curvas de retenção de água destes.

O presente trabalho parte da premissa que a compactação do solo é um fator restritivo na produtividade, no entanto, o déficit hídrico, em determinadas épocas do ano, também é um fator claramente importante na produção de café por sua direta relação com o amadurecimento dos grãos (ALVES, 2007; MOLINA et al., 2020). Por outro lado, a presença de compactação requer um manejo do ponto vista operacional mais complexo, embora possa ser atenuado adicionando maiores conteúdos de água e fertilizantes, situação que cria condições mais favoráveis para a planta com menor esforço na procura desses elementos pelas raízes, em contraposição aumentando os custos de produção e o efeito ambiental pelo alto gasto de água.

4.3 Atributos químicos

Os resultados de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas diferentes posições, quando comparadas entre áreas e profundidades, mostraram que na posição saia (S), as áreas BV06, BA08, BA14, BV09 e CT01a apresentam 1,18; 1,21; 2,72; 3,38; 2,61 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca^{2+} e 0,45; 0,46; 0,58; 1,33 e 0,62 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Mg^{2+} , respectivamente (Tabela 11) na profundidade 0-0,2 m tiveram menores teores em relação à posição rodado (R), no caso: 4,39; 4,75; 5,90; 8,1; 5,55 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca^{2+} e 1,79; 1,73; 1,70; 2,46 e 1,92 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para os teores de Mg^{2+} , respectivamente, na profundidade de 0-0,2 m. Destacam-se as áreas BV06 e BA08 que, na posição S apresentaram os menores teores de nutrientes, enquanto que para a posição R aumentaram, sendo similares aos das áreas BA14 e CT01a. Esses resultados na posição S eram esperados, uma vez que é nessa região que a planta de café tem a maior concentração de raízes e a data da coleta de solos foi durante a colheita da safra, demonstrando que os nutrientes aplicados na posição S foram absorvidos, e que a parte de fertilizantes que ficou na posição do rodado não foi utilizado pela planta, provavelmente porque o cafeeiro não conseguia colonizar a posição devido aos efeitos da mecanização.

Os baixos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em 0-0,2m de profundidade das áreas BBV06 e BA08 em S podem ser explicados pela relação que existe entre a textura, a CTC e a matéria orgânica (CENTENO et al., 2017). Silva et al. (1994), em seus estudos, avaliaram as interações entre matéria orgânica e CTC em dois solos, sendo um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho Amarelo, respectivamente de textura média e argilosa, constatou que a diminuição nos teores de MO foi sincrônico ao decréscimo da CTC em pH 7,0, como também ao período de cultivo, verificado por Centeno et al. (2017). Solos arenosos possuem menores teores de matéria orgânica, comparados aos solos com maiores teores de argila, pois proteção que a argila oferece, estabiliza a matéria orgânica, nesse caso é menor e, conseqüentemente, apresentam menores CTC, ou seja, baixa capacidade de adsorção de cátions (BRADY, WELL, 2013).

Destaca-se que a área AR17 teve um comportamento diferente em relação às demais áreas, apresentando teores maiores de Ca^{2+} e Mg^{2+} na posição S (7,63 e 1,79 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e na posição R (5,04 e 2 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) na profundidade 0-0,2 m. Esses altos valores podem ser explicados por ser uma lavoura plantada em 2017, conservando altos teores de Ca^{2+} aplicados via calagem com incorporação no momento do preparo do solo para o plantio. Também deve-se ao efeito residual da calagem, com reflexo ainda no pH sendo de 5,47 na posição S e 5,43 na

posição R, os dois na profundidade 0-0,2 m, e também os baixos teores de areia quando comparado com as áreas BV06 e BA08.

4.4 Análises dos radargramas

Rossel et al. (2011) sinalizam que as ondas de rádio com frequências elevadas aumentam a resolução do radargrama e, como consequência a profundidade de penetração do sinal eletromagnético diminui. Ao avaliar o alcance e resolução das antenas de 400 e 900 MHz, a primeira atingiu em média 2,2 m em profundidade. A segunda antena, de 900 MHz, alcançou 0,9 m obtendo uma resolução maior do que a antena de 400MHz em detrimento da profundidade de penetração do sinal eletromagnético. Como a compactação é vista nas camadas superficiais, a perda no alcance de profundidade não influenciou nos resultados, no entanto, a primeira antena utilizada, apesar de um alcance maior, apresentou uma baixa resolução, não sendo possível nem observar a presença das raízes do cafeeiro. Assim, considerou-se os radargramas da frequência 900MHz os mais adequados para este estudo por serem mais detalhados.

Com base nos radargramas obtidos nas áreas BV06 (Anexos: Figura 2), BA08 (Anexos: Figura 3), BV15 (Anexos: Figura 4), BA14 (Figura 9), BV09 (Anexos: Figura 5) e AR17 (Figura 10) e com o objetivo de identificar alguma variação na estrutura do solo em subsuperfície que pudesse auxiliar na identificação da presença de camadas compactadas e/ou alterações nas camadas do solo, foi realizada uma análise descritiva das imagens entre as áreas, uma vez que não foi possível isolar hipérbolos para a obtenção de constantes dielétricas do solo. As comparações feitas se concentraram nas áreas BA14 e AR17 caracterizando-se, de acordo com os resultados das análises físicas e químicas anteriormente discutidas, como áreas de contraste em relação aos valores de RP_{med} , RP_{max} e PT .

Na área BA14 foram destacadas as perturbações observadas. No radargrama da área (Figura 9), observou-se, nas distâncias de 4, 8, 12 e 16 m, perturbações correspondentes às raízes das plantas, atingindo profundidade aproximada de 0,7 m, sendo essas raízes possíveis de serem visualizadas as de maior calibre, sendo as responsáveis pela sustentação das plantas. Abaixo dessa profundidade não se observa mais diferenças ou modificações com o solo. Nas distâncias de 2, 6, 10 e 12 m, as posições das entrelinhas (EL), destaca-se que o solo, nessas posições, apresenta uma estrutura mais homogênea na horizontal e verticalmente, visto que não há plantas de grande porte, somente algumas plantas espontâneas e não há passada de máquinas agrícolas.

No radargrama da área AR17 (Figura 10) nota-se tanto a homogeneidade horizontal quanto vertical na profundidade de 0,0 a 0,2 m. Essa homogeneidade obedece ao fato de ser uma área plantada no ano 2017, com solo em processo de acomodação, dificultando a visualização de mudanças estruturais em subsuperfície como também os altos teores de argila que atenua as ondas eletromagnéticas diminuindo a resposta do radargrama. Nas profundidades abaixo de 0,2 m, é possível observar um padrão diferente da superfície, com perturbação das camadas do solo, ainda em processo de acomodação, o que não permite a identificação do sistema radicular, apesar de que nas marcações de 0,0, 4,0, 8,0, e 12,0 m as camadas subsuperficiais pareçam estar mais perturbadas. No entanto, tal fato pode ser somente reflexo do intenso revolvimento do solo para retirar a cultura anterior e os demais preparos culturais para o atual plantio.

A constante dielétrica k de qualquer material no solo pode refletir ou atenuar a propagação da energia eletromagnética (CEZAR et al., 2012; WIJEWARDANA et al., 2017), sendo que a intensidade do sinal da onda refletida diminui com o aumento dos níveis de condutividade elétrica (WIJEWARDANA et al., 2017). A água apresenta valor de k próximo a 80, o ar aproximadamente 1 e os materiais minerais e orgânicos entre 3 e 7 (TOPP et al. 1980), contrastes entre valores de k esses que proporcionariam uma vantagem para a utilização do GPR para medir variações no teor de água do solo a partir de leituras no radargrama (PAIXÃO et al., 2006).

A determinação de valores de k nos radargramas das áreas do estudo não foram possíveis devido à dificuldade na obtenção de hipérbolos características, e posteriormente na obtenção de k , resultado explicado devido ao alto teor de argila no perfil do solo que atenuou a propagação dos campos de ondas eletromagnéticas pela sua elevada condutividade elétrica, confirmado também por Davis e Annan (1989), Doolittle e Collins (1995) e Cezar et al. (2010). Outro fator que influenciou o resultado é o elevado conteúdo de óxidos de ferro que podem diminuir a velocidade de propagação das ondas influenciando na reflexão, demonstrado por Dam et al. (2002).

A condutividade elevada, característica do solo em questão, acabou reduzindo a resposta eletromagnética do GPR, sendo a mineralogia uma característica importante para esse tipo de estudos, visando numa melhor eleição do método, calibração e tipo de antena mais adequado. Resultados similares foram obtidos por Cezar et al. (2010) para um Latossolo Vermelho

eutroférico com elevada proporção de hematita e magnetita, o que dificultou o emprego do equipamento.

Não obstante, o GPR fornece bons resultados na determinação de diferenças no subsolo quando apresenta contrastes entre os tipos de materiais que o compõem, e que por sua vez apresentem baixo teor de argila, isso gera um valor de constante dielétrica (k) muito variável para cada material, e influencia a baixa ou alta condutividade elétrica, dando como resultado um contraste nos radargramas como relatado por Allred et al. (2008). Carli (2016) identificou ambientes de contraste dielétricos abruptos e gradativos. Neste estudo, independente da frequência das antenas, não foi possível distinguir mudanças ou alterações sutis nas camadas do solo, corroborando com Doolittle e Butnor (2009), mas foi suficiente para perceber mudanças estruturais que implicam movimentos e/ou presença de materiais diferentes aos componentes do solo, como presença de raízes em profundidade.

A baixa umidade do solo também pode ter contribuído para a menor eficiência do método, visto que a água, como já mencionado, apresenta uma alta constante k , interferindo na resolução das imagens obtidas. Apesar de na segunda época de coleta de dados no campo, realizado entre a primeira e segunda semana de novembro, as chuvas na região já terem se iniciado, no ano de 2021 a região conviveu com déficit hídrico, iniciando a temporada de chuvas somente no final do mês de novembro, enquanto historicamente a estação úmida de inicia em outubro. As umidades coletadas em alguns casos foram inferiores aos valores de ponto de murcha permanente (PMP), podendo especular que em casos de teores maiores de umidade, ter obtido melhores respostas das imagens.

4.5 Produtividade de *Coffea arabica* L. na área de estudo

O cafeeiro é uma planta que possui um ciclo produtivo de dois anos e que, na maioria dos casos, apresenta alta produção em um ano, e no seguinte, devido ao estresse e desgaste na planta pela carga do ano anterior, acaba tendo uma produção substancialmente menor. Tal comportamento é conhecido como bienalidade do café. Desta forma, não é ideal comparar a produtividade entre talhões em um único ano, pois cada um pode estar em fase diferente do ciclo bienal, podendo uma área estar no ano de alta produção e o outro, no de baixa. De acordo com os valores de produtividade apresentados na Tabela 1, a baixa produtividade da última safra do ano 2021 das áreas BA08, BV09, BV06 e BV15 que foi de 4,63; 8,64; 20,90 e 42,29 sacas ha^{-1} , respectivamente, em comparação à área BA14 (82,56 sacas ha^{-1}) pode ser explicada pelo comportamento bienal da cultura (SILVA et al., 2010; MENDONÇA et al., 2011;

PEREIRA et al., 2011; ALVES, 2019), resultante do menor crescimento dos ramos plagiotrópicos (DUBBERSTEIN et al., 2017).

Quando analisados os dados da safra de 2019/2020, observou-se, nos dados de produtividade, que os valores foram superiores para as áreas anteriormente citadas (63, 90, 61, e 41 sacas ha^{-1} respectivamente) com exceção da área BV15 com produtividade similar (41 sacas ha^{-1}), sendo que para o mesmo ano produtivo, o talhão da área BA14 foi esqueletado, prática comum de ocorrer após a colheita do ano de alta produtividade, visando a renovação dos ramos plagiotrópicos. A principal intenção de realizar esse tipo de poda, é que aumente a produção para o ano seguinte pelo surgimento de novos ramos produtivos, como pode ser observado na safra 2020/2021, com 82,56 sc ha^{-1} .

Se essas diferenças na produtividade são devido ao comportamento bienal do cafeeiro, as características do solo onde são desenvolvidas as culturas reflete também nessas produtividades (MOREIRA et al., 2018), sendo que as áreas BV06, BA08, BV15, BA14 e BV09 tratam-se de um mesmo cultivar (Bourbon). Historicamente, a área BA14 tem se caracterizado por apresentar alta produtividade ao comparar-se com as demais, com exceção do biênio 2017/2018 onde a área BV09 teve a maior produtividade (89 sacas).

Destaca-se que as áreas BV06 e BA08 nos anos de baixa carga (2016/2017, 2018/2019 e 2020/2021), a produção foi consideravelmente inferior (3,1 e 20,9 sc ha^{-1} para a área BV06 e 11,5 e 4,63 sc ha^{-1} para a área BA08 nos anos respetivos) que nas demais áreas do mesmo cultivar. Esses resultados podem ser explicados pelas características das áreas em relação à topografia, à textura, que refletem no conteúdo de nutrientes e retenção de água no perfil do solo, sendo esses resultados discutidos anteriormente. É possível evidenciar essa resposta através do vigor das plantas, como identificado mediante a utilização de índices, no caso o NDVI.

Depois da última colheita no ano de 2021, as áreas CT01a e CT01b com cultivares Catuaí Vermelho, foram arrancadas para a renovação da lavoura, visto que eram plantas com 20 anos de cultivo, já com baixa produtividade. No lugar dessas duas áreas, o solo foi preparado e a variedade implementada foi a Arara, mesma cultivar plantada na área AR17. Segundo informações obtidas na propriedade, a escolha do cultivar Arara é uma tendência que vem sendo empregada na fazenda, devido à boa produção que se tem observado na planta, resistência a pragas e sua tolerância ao déficit hídrico. Apesar de complementar via irrigação, a escolha das

cultivares leva em conta a possibilidade de dificuldades futuras na irrigação, especialmente em tempos de mudanças na dinâmica climática que causa irregularidade nos períodos chuvosos,

A área AR17 para a safra de 2020/2021, apesar de estar no ano de baixa produção, e ter sido afetada por corda-de-viola (*Ipomoea sp*) encobrendo diversas plantas apresentou boa produção (36,23 sacas ha⁻¹), acima da média estimada brasileira de 2021, em torno de 25,2 sacas ha⁻¹ para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro de café arábica (CONAB, 2022), por tratar-se de biênio negativo, e tendo uma boa produção no biênio de 2019/2020 com 60 sacas ha⁻¹, que foi o segundo ano produtivo das plantas. Essa área caracterizou-se por apresentar poucas diferenças significativas na avaliação dos atributos químicos e físicos do solo, pelo fato de ser uma área recente que conserva ainda características preparo do solo para o plantio. Essa área não manifestou nenhuma restrição ao crescimento do café, no entanto, os resultados das análises físicas apresentam uma tendência que a estrutura pode mudar no transcurso dos anos. Os dados de NDVI calculados tiveram um baixo vigor (<0,7), porém não reflete um tipo de restrição no subsolo, pois a altura média era inferior a 1,50 m, já que se trata de um café em desenvolvimento e de uma cultivar de porte baixo, com altura máxima menor que 2,0 m. Como a planta não cobre parte das entrelinhas, deixando parte do solo exposto, tal condição atenua a resposta espectral da planta, o que faz com que os valores de NDVI, nesse caso, encontrassem pertos de -1 (MOTA, 2020).

Outra observação feita em campo para explicar o baixo vigor foi a presença de corda de viola (*Ipomoea sp.*) planta com alta capacidade invasora, considerada indesejável em muitos sistemas de produção agrícolas, pela alta capacidade de colonizar outras espécies vegetais, diminuindo a captação de luminosidade para os processos fisiológicos. Essa planta tinha recebido o trato para sua eliminação, apresentando-se seca no topo dos cafeeiros, implicando em baixa refletância do vigor da cultura.

Finalmente na área BA14 com valores mais altos de RP e menores volumes de PT nas posições dos rodados, não se pode afirmar que essas características estão influenciando na diminuição da produtividade desse talhão, pois pode ser pelo fato de tratar-se de uma lavoura recente, plantada no ano 2014, no auge produtivo da planta, localizada numa topografia plana. Provavelmente, o tráfego de máquinas não gera uma limitação para seu bom desenvolvimento, uma vez que a partir de observações as raízes se apresentavam próximas à superfície, direcionadas pelo gotejador, e ainda favorecidas pela adubação a lanço, sem incorporação, não necessitando a planta de aumentar o volume de solo explorado pelas raízes. No entanto, esses

valores encontrados das propriedades físicas devem ser monitorados com cautela nos anos seguintes pois há a tendência na alteração física do solo, que podem comprometer o sistema solo-planta, principalmente no caso de anos com baixo volume de precipitação, em que haja baixa disponibilidade hídrica para complementar via irrigação.

5 Considerações Finais

O efeito do tráfego de máquinas causa alterações nos atributos físicos do solo, comprovado pelas variações nos valores dos indicadores de PT, RPmed, RP max e RPmin comparados entre as posições de coleta.

A área AR17, com 3,5 anos de plantio até a data do estudo, não apresentou diferenças significativas dos valores de PT, RPmed, RPmax e RPmin nas diferentes posições de coleta, portanto, o período de tempo compreendido entre o plantio até o quarto ano do estabelecimento da cultura de cafeeiro poder ser considerado como adequado para realizar práticas visando diminuir e/ou atenuar por um período mais prolongado o efeito do tráfego de máquinas. Após o quarto ano, o manejo dos efeitos da compactação é complexo operacionalmente, custoso e implica em consequências.

Práticas como a implementação de consórcios utilizando espécies vegetais que não sejam competitivas com o cafeeiro nas entrelinhas do plantio podem ajudar a diminuir a pressão exercida pelos equipamentos, além de servir como fonte de nutrientes e matéria orgânica. A braquiária vem sendo utilizada em alguns lugares como uma opção, posto que as raízes profundas (0,8 m) ajudam na estruturação do solo e na formação de bioporos após cada ceifa de forragem pela decomposição desses tecidos, como também ajudando a preservar a umidade e alocando os nutrientes das entrelinhas (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013). A escolha da espécie vegetal deve ser feita visando na melhor adaptação e vantagens com o sistema produtivo. Outra prática na mitigação da compactação pode ser o manejo eficiente do trânsito dentro dos talhões, alinhando o traçado das máquinas agrícolas em uma faixa de tráfego (MASOLA, 2020), prática útil para incrementar a recuperação da qualidade do solo.

6 Conclusões

A técnica de análise de componentes principais (PCA) se revelou importante neste estudo, uma vez que possibilitou reduzir o número de atributos físicos e químicos, destacando aqueles mais relacionados com as alterações dos solos nas áreas de estudo.

A porosidade total e a resistência à penetração média e máxima demonstraram a existência de compactação nas faixas dos rodados alto e baixo no plantio de café.

O método geofísico GPR não identificou mudanças dos atributos físicos em subsuperfície para Latossolos e o manejo adotado no cafeeiro.

O NDVI identificou mudanças no vigor do cafeeiro associado a algum tipo de estresse biótico ou abiótico, sendo necessário uma validação em campo para a correta identificação e diagnóstico.

A lavoura com 3,5 anos de plantio não apresenta variação significativa na porosidade total, resistência à penetração média e máxima como medidas indiretas de compactação, no entanto, demonstra a tendência de ocorrência do fenômeno.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTRA, E.N; FERREIRA, M.M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, ed. 24, p. 711-721, 2000.
- ALLRED, B; DANIELS, J.J.; EHSANI, M.R. Handbook of agricultural geophysics. CRC Press, 2008.
- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ALVES, J.D. Morfologia do cafeeiro. Cultivares de café: origem, características e recomendações. Brasília: Embrapa Café, v. 1, p. 35-56, 2008.
- CARLI, J.C.A. Aplicação de GPR para estimar espessura e disposição lateral de horizontes do solo e do embasamento granítico a sudeste do Campus 2 da Unipampa Campus Caçapava do Sul. 2016.
- ARAUJO-JUNIOR, C.F. et al. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. Planta Daninha, v. 29, n. 3, p. 499–513, set. 2011.
- ASSOULINE, S.; TESSIER, D.; TAVARES-FILHO, J. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. Soil Science Society of America Journal, v. 61, n. 2, p. 390-398, 1 mar. 1997.
- BARETA JUNIOR, E. et al. Critical limits of soil physical attributes for corn and black oat in a Xanthic Hapludox. Revista Ciência Agronômica, v. 53, 2021.
- BERGAMIN, A.C. et al. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 681-691, 2010.
- BURAK, D.L.; PASSOS, R.R.; ANDRADE, F.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. Bragantia, v. 71, p. 538-547, 2012.
- BURAK, D.; PASSOS, R.; SARNAGLIA, S. Utilização de análise multivariada na avaliação de parâmetros geomorfológicos e atributos físicos do solo. Enciclopédia Biosfera, v. 6, n. 09, 2010.
- CARMO, D.L. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiro em três sistemas de manejo no sul de Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, n. 3, p. 991–998, jun. 2011.
- CARVALHO, L.C.C. et al. Spatial variability of soil physical attributes and agronomic characteristics of coffee crop. Coffee Science, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.
- CASSIDY, N.J.; JOL, H.M. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. Ground penetrating radar: theory and applications, p. 141-176, 2009.

- CENTENO, L.N. et al. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.
- CEZAR, E. et al. Evaluation of soil properties under sugar cane by GPR (Ground Penetrating Radar) system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 291-298, 2010.
- CEZAR, E. et al. Emprego de GPR no estudo de solos e sua correlação com métodos laboratoriais. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 33, n. 3, p. 979-987, 2012.
- CODEMIG, Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. CPRM. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Escala 1:1000.000. 2013. Disponível em: <<http://www.codemig.com.br/atuacao/mineracao/mapeamento-geologico/2013-mapa-geologico-de-minas-gerais/>>. Acesso em: 25 out. 2022.
- CONAB, Companhia Nacional do Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira. Boletim da Safra 2021, v. 9, n. Terceiro levantamento, p. 60, 2022.
- CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. Boletim da Safra 2021, v. 8, n. Terceiro levantamento, p. 59, 2021.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. A Cultura do Café: análise dos custos de produção e da rentabilidade nos anos-safra 2008 a 2017. *Compêndio de Estudos Conab*, v. 12, n. 2448-3710, p. 54, 2017.
- CONCEIÇÃO, P.C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 777-788, 2005.
- CORTEZ, J.W. et al. Modificação dos parâmetros físico-hídricos do solo sob diferentes sistemas de irrigação na cafeicultura. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 5, n. 2, p. 244-249, 2010.
- CORTEZ, J.W. et al. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1207-1216, 2011.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1. *Geophysical prospecting*, v. 37, n. 5, p. 531-551, 1989.
- DOOLITTLE, J.A.; COLLINS, M.E. Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, v. 33, n. 1-3, p. 101-108, 1995.
- DUBBERSTEIN, D. et al. Matéria seca em frutos, folhas e ramos plagiotrópicos de cafeeiros cultivados na Amazônia Ocidental. *Coffee Science*, v. 12, n. 1, p. 74-81, 2017.
- EFFGEN, T.A.M. et al. Physical soil properties as a function of management in crops of Conilon coffee. *Revista Ceres*, v. 59, p. 414-421, 2012.
- FAZUOLI, L.C. et al. Avaliação das cultivares mundo novo, bourbon amarelo e bourbon vermelho de *Coffea arabica* L. em Campinas, SP. *Bragantia*, v. 64, p. 533-546, 2005.
- FENG, G.; WU, L.; LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. *Soil Science*, v. 167, n. 8, p. 495-503, 2002.
- FERNANDES, M.I.S. et al. Parâmetros produtivos e de qualidade de cultivares de cafeeiros na região do Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, p. e147996681-e147996681, 2020.
- GEOPORTAL DO CAFÉ. Disponível em: <<http://portaldocafedeminas.emater.mg.gov.br/>>.

Acesso em: 12 mar. 2021.

- GOMES, L.C. et al. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 294, p. 106858, 2020.
- GONTIJO, I. et al. Atributos físico-hídricos de um Latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2227-2234, 2008.
- GOULARTE, G.D. Porosidade de aeração e relações hídricas na produtividade do cafeeiro irrigado em Latossolo Roxo, no sul de Minas Gerais. 2014.
- GROSSO, J.A. et al. Caracterización del estado de compactación de un suelo bajo siembra directa utilizando herramientas de geoestadística. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNR*, n. 34, p. 004, 2020.
- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. In: *Advances in Soil Science*. Springer, New York, NY, 1987. p. 65-100.
- KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1 jul. 1997.
- KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.R. Roteiro da excursão pedológica Viçosa-Sete Lagoas. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*. 1995.
- LADEIA, C.A. et al. Sensor ativo como ferramenta de estimativa de nitrogênio e clorofila em variedades de café. In: *X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, 2019.
- LIMA, R.P; SILVA, A.R; APARECIDA, J. Importância de atributos físicos do solo na identificação da compactação. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 13, 2013.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, v. 116, n. 1-2, p. 107-136, 2003.
- LOPES, A.G.C. et al. Desempenho operacional e custo da subsolagem com e sem rodado duplo no trator agrícola. *Energia na Agricultura*, v. 35, n. 3, p. 317-329, 2020.
- LUCIANO, R.V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1733-1744, 2012.
- LYNCH, J.P.; WOJCIECHOWSKI, T. Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. *Journal of Experimental Botany*, v. 66, n. 8, p. 2199-2210, 2015.
- MAIA, I.C. Compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas. 2016. Repositório Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/36713>>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- MARTÍNEZ, A.R.; RODRÍGUEZ, R.P.; PÉREZ, A.S. Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v. 20, n. 1, p. 25-30, 2011.

- MARTINS, P.C.C. et al. Compactação causada pelas operações mecanizadas em um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros ao longo do tempo. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 36, n. 4, p. 391-398, 2012a.
- MARTINS, P.C.C. et al. Structural sustainability of Cambisol under different land use system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1724-1732, 2012b.
- MASOLA, M.J. et al. Advantages of the one-wheeled tramline for multiple machinery widths method on sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.) responses in the Argentinean Flat Pampas. *Soil and Tillage Research*, v. 196, p. 104462, 2020.
- MEDINA, C.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; CORTÉS, C.A. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Engenharia Agrícola*, v. 32, p. 91-101, 2012.
- MELO, L.B.B. et al. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil and Tillage Research*, v. 208, p. 104876, 2021.
- MENDONÇA, R. et al. Abordagem sobre a bienalidade de produção em plantas de café. *Enciclopédia Biosfera*, v. 7, n. 13, 2011.
- MOAT, J. et al. Resilience potential of the Ethiopian coffee sector under climate change. *Nature Plants*, v. 3, n. 7, p. 1-14, 2017.
- MOLINA, P.C.P. et al. Fenómenos meteorológicos y su efecto sobre la producción de café en la Zona Central de Veracruz. *UVserva. Una mirada desde los observatorios*, n. 9, p. 47-58, 2020.
- MOREIRA, S.L.S. et al. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 256, p. 379-390, 2018.
- MOTA, F.M. et al. Relação entre variáveis meteorológicas e Índices de Vegetação (IV's) em lavouras cafeeiras. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 3, n. 4, p. 4187-4209, 2020.
- MOTTA, P.E.F. et al. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p. 869-878, 2002.
- NADERI-BOLDAJI, M.; KELLER, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. *Soil and Tillage Research*, v. 159, p. 41-46, 2016.
- NAGHDI, R. et al. Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. *Pedosphere*, v. 30, n. 4, p. 508-516, 2020.
- OLIVEIRA, V.S. et al. Compaction of a Ultisol submitted to different managements. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 914-920, 2010.
- ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 619-626, 2014.

- PAGLIAI, M. et al. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*, v. 73, n. 1-2, p. 119-129, 2003.
- PÄIVÄNEN, J. et al. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Suomen metsätieteellinen seura*, 1973.
- PAIXÃO, M.S.G.; PRADO, R.L.; DIOGO, L.A. Análise do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, p. 189-198, 2006.
- PALMA, M.A.Z. et al. Soil penetration resistance in coffee plantations cultivated with mechanized and manual systems. *Coffee Science*, v. 8, n. 3, p. 364-370, 2013.
- PEREIRA, S.P. et al. Crescimento, produtividade e bienalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 152-160, 2011.
- RAGASSI, C.F.; PEDROSA, A.W.; FAVARIN, J.L. Aspectos positivos e riscos no consórcio cafeeiro e braquiária. *Visão Agrícola*, Piracicaba, n. 12, p. 29-32, 2013.
- RICHMOND, P.; RILLO, S. Evaluación del efecto de la compactación por el rodado de maquinarias sobre algunas propiedades físicas del suelo y el cultivo de trigo en siembra directa. *INPOFOS Informaciones Agronómicas*, v. 32, p. 22-25, 2006.
- ROSSEL, R.V. et al. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time. *Advances in agronomy*, v. 113, p. 243-291, 2011.
- SÁ, M.A.C. et al. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1610-1622, 2016.
- SALAT, C.; JUNGE, A. Dielectric permittivity of fine-grained fractions of soil samples from eastern Spain at 200 MHz. *Geophysics*, v. 75, n. 1, p. J1-J9, 2010.
- SALES, R.P. et al. Physical quality of a Latosol under no-tillage and conventional tillage in the semi-arid region. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 47, p. 429-438, 2016.
- SANTINATO, F. et al. Sistema radicular do cafeeiro em lavouras irrigadas mecanizadas das cultivares Catuaí, Acauã Novo e Apoatã. 2018. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/11540>>. Acesso em: 2 out. 2022.
- SEGER, M.A. et al. Detection of water-table by using ground penetration radar (GPR). *Engineering and Technology Journal*, v. 29, p. 554-566, 2011.
- SILVA, B.M. et al. Capacidade de água disponível no solo para as plantas: métodos de estimativa e implicações. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 464-475, 2014.
- SILVA, A.L.; FARIA, M.A.; REIS, R.P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, p. 37-44, 2003.
- SILVA, E.N.S. et al. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 598-607, 2015.

- SILVA, F.M. et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, p. 625-632, 2010.
- SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 18, n. 3, p. 541-547, 1994.
- SILVA, M.R.R. et al. Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, v. 31, n. 4, p. 305-313, 2013.
- SILVA, R.B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 973-983, 2003.
- SILVA, R.E.; SILVA, G.A. A importância do clima na instalação e produção cafeeira no cerrado mineiro: o caso de Patrocínio no Alto Paranaíba (MG). *Revista Geonorte*, v. 3, n. 9, p. 840-852-840-852, 2012.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II-Grau de saturação em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 9-16, 2002.
- SILVEIRA, D.C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 34, p. 659-667, 2010.
- SOUZA, G.S. et al. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 135-146, 2014.
- SOUZA, G.S.; DAN, M.L.; ARAÚJO, J.B.S. Qualidade física do solo sob cafeeiro Conilon consorciado e em monocultivo. *Coffee Science*, v. 11, n. 2, p. 180-186, 2016.
- FERNANDES, A.L.; SANTINATO, F.; SANTINATO, R. Utilização da subsolagem na redução da compactação do solo para produção de café cultivado no cerrado mineiro. *Enciclopédia Biosfera*, v. 8, n. 15, 2012.
- THEODOROU, C.; CAMERON, J. N.; BOWEN, G. D. Growth of roots of different *Pinus radiata* genotypes in soil at different strength and aeration. *Australian Forestry*, v. 54, n. 1-2, p. 52-59, 1991.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.
- TORMENA, C.A. et al. Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an Oxisol managed by different soil tillage systems. *Scientia Agricola*, v. 59, p. 795-801, 2002.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 573-581, 1998.

- DAM, R.L.V. et al. Iron oxides as a cause of GPR reflections. *Geophysics*, v. 67, n. 2, p. 536-545, 2002.
- VAN LIER, Q.J. Gases no solo. In: Quirijn de Jong van Lier. (Org.). *Física do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 153-176.
- WIJEWARDANA, Y. N. S. et al. Ground-penetrating radar (GPR) responses for sub-surface salt contamination and solid waste: modeling and controlled lysimeter studies. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 2, p. 1-15, 2017.
- YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil and Tillage Research*, v. 84, n. 2, p. 200-215, 2005.

ANEXOS

Tabela 1 – Caracterização visual das trincheiras das áreas de cultivo na área de estudo

Área de cultivo	Altitude (m)	Observações
BV06	954	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 130 cm; Posição baixa: 115 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 86 cm; Posição baixa: 115 cm Alta presença de bioporos nos primeiros 50 cm de profundidade no perfil. Posição baixa apresentou cascalho com plintita e até algumas petroplintitas. Topografia ondulada, com cerca de 8 % de declividade.
BA08	983	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 115 cm; Posição baixa: 100 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 132 cm; Posição baixa: 120 cm Cor de solo vermelho, textura “pó de café” em profundidade. A posição alta concentra maior volume de raízes em comparação com a posição baixa. A maior concentração de raízes se observa entre 50 e 100 cm de profundidade na posição da saia. Topografia declivosa.
BV15	1066	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 118 cm; Posição baixa: 100 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 115 cm; Posição baixa: 115 cm Na posição baixa apresenta mosqueado na profundidade de 60 cm, na posição das entrelinhas e concreções ferruginosas esparsas. Cor do solo até 20 cm de profundidade amarelada, >20 cm color avermelhado. Topografia semideclivosa em comparação com as áreas BV06 e BA08.
BA14	1082	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 110 cm; Posição baixa: 105 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 132 cm; Posição baixa: 135 cm Presença de bioporos como indicativo de alta atividade biológica. Até os primeiros 30 cm de profundidade o solo apresenta cor escura (tons marrom e cinzas), depois muda para vermelho. Nas posições das entrelinhas e saias observou-se presença de cascalho até uma profundidade de 40 cm. Topografia plana.
BV09	1089	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 105 cm; Posição baixa: 95 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 155 cm; Posição baixa: 115 cm Presença de alto conteúdo de MO na camada de 0 a 10 cm. Entrelinha cascalhenta e RB na profundidade de 10 a 20 cm. Topografia plana.
CT01a	1078	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 87 cm; Posição baixa: 66 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 100 cm; Posição baixa: 120 cm Presença de bioporos. Na posição baixa apresenta camada de matéria orgânica de 3 cm. Topografia plana.
AR17	1080	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 100 cm; Posição baixa: 100 cm Expansão horizontal das raízes: até o final da posição S para os dois casos. Topografia plana.
CT01b	1061	Profundidade máxima observada de raízes: Posição alta: 105 cm; Posição baixa: 105 cm Expansão horizontal das raízes: Posição alta: 108 cm; Posição baixa: 125 cm Observa-se raízes com tendência horizontal. Área localizada no borde da chapada. A maior concentração (80%) de raiz encontra-se nos primeiros 60 cm de profundidade. Presença de manchas avermelhadas e pequenas concreções ferruginosas com tamanho > 2 mm, presença de cascalho branco e mosqueado nos 80 cm de profundidade. Topografia suave, próximo à borda da chapada.

Tabela 2 - Histórico das áreas de cultivo da Fazenda Chuá, Patos de Minas-MG

Área	Histórico
BV06	Implantação da lavoura de café no ano de 1987, tendo sido utilizada, anteriormente para plantio de cana de cana de açúcar para alimentação animal (gado leiteiro).
BA08	Implantação da lavoura de café no ano de 1987, tendo sido utilizada, anteriormente para plantio de cana de cana de açúcar para alimentação animal (gado leiteiro).
BV15	No ano de 1990 foi implantando a cultura do café, sendo que anteriormente havia, pastagens para bovinocultura extensiva, sendo os pastos divididos por linhas de eucaliptos. Ainda há alguns remanescentes de eucalipto na área.
BA14	Área mais antiga da fazenda, primeira a ser cultivada com café. Antes da cafeicultura, também era utilizada para pastagem pelo antigo proprietário. Após aquisição, houve um ciclo de soja sendo posteriormente implantado o café, o que aconteceu no ano de 1984.
BV09	Área mais antiga da fazenda, primeira a ser cultivada com café. Antes da cafeicultura, também era utilizada para pastagem pelo antigo proprietário. Após aquisição, houve um ciclo de soja sendo posteriormente implantado o café, o que aconteceu no ano de 1984.
CT01a e CT01b	Área de pastagem desde a retirada do cerrado até o ano de 2000/2001, quando foi iniciado o cultivo de café. Em 2021 um novo plantio foi feito a cultivar Arara. Anteriormente era uma pastagem criação extensiva de gado.
AR17	Área foi adquirida no ano 2005 e plantada com café Bourbon nesse mesmo ano. No ano 2017 o cultivar Bourbon foi trocado por o cultivar Arara, é a área com a cultura de café mais nova. Segundo plantio de café.

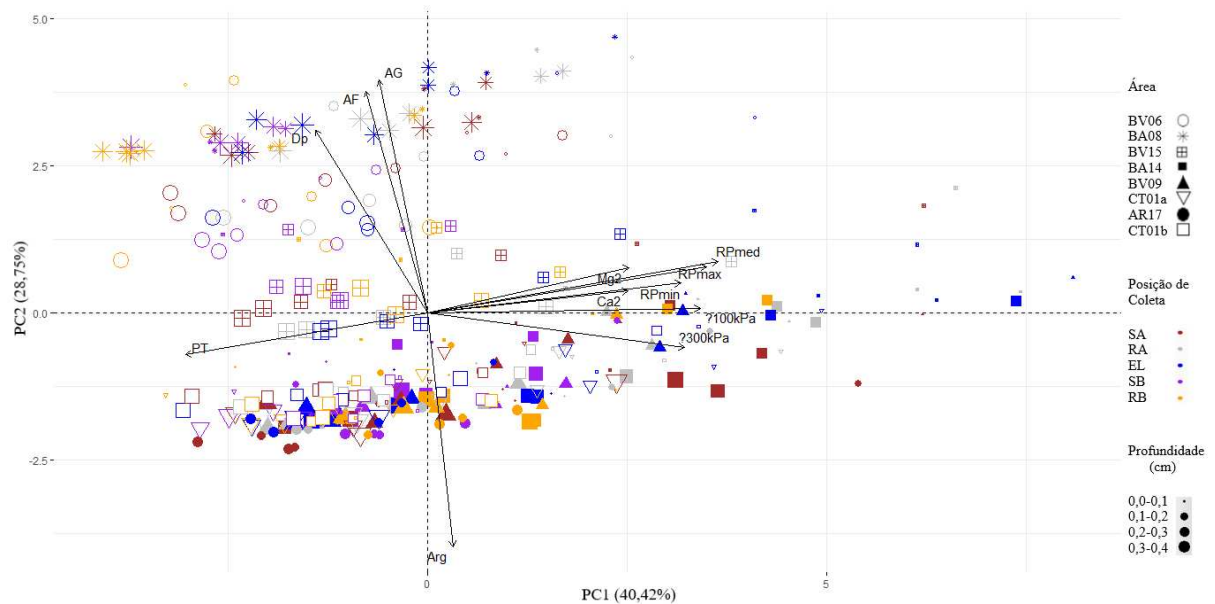


Figura 1. Dispersão gráfica de atributos, áreas e posições de coleta nas profundidades 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m por componentes principais CP1 e CP2 dos atributos físicos e químicos para um Latossolo Vermelho de Alto Paranaíba-MG; Legenda: Áreas: cultivar Arara plantado em 2017 (AR17), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2008 (BA08), cultivar Bourbon Amarelo plantado em 2014 (BA14), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2006 (BV06), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2009 (BV09), cultivar Bourbon Vermelho plantado em 2015 (BV15), cultivar Catuaí plantado em 2001 área a (CT01a), cultivar Catuaí plantado em 2001 área b (CT01b); Posições de coleta: Saia Alta (SA), Rodado Alto (RA), Entrelinha (EL), Rodado Baixo (RB), Saia Baixa (SB); Atributos: Densidade de partícula (Dp), Areia Fina (AF), Porosidade Total (PT), Argila (Arg), Resistência à Penetração média (RPmed), Resistência à Penetração máxima (RPmax), Resistência à Penetração mínima (RPmin), Umidade em base volumétrica (θ) a 300 kPa (θ 300 kPa), Umidade em base volumétrica (θ) a 100 kPa (θ 100 kPa), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg).

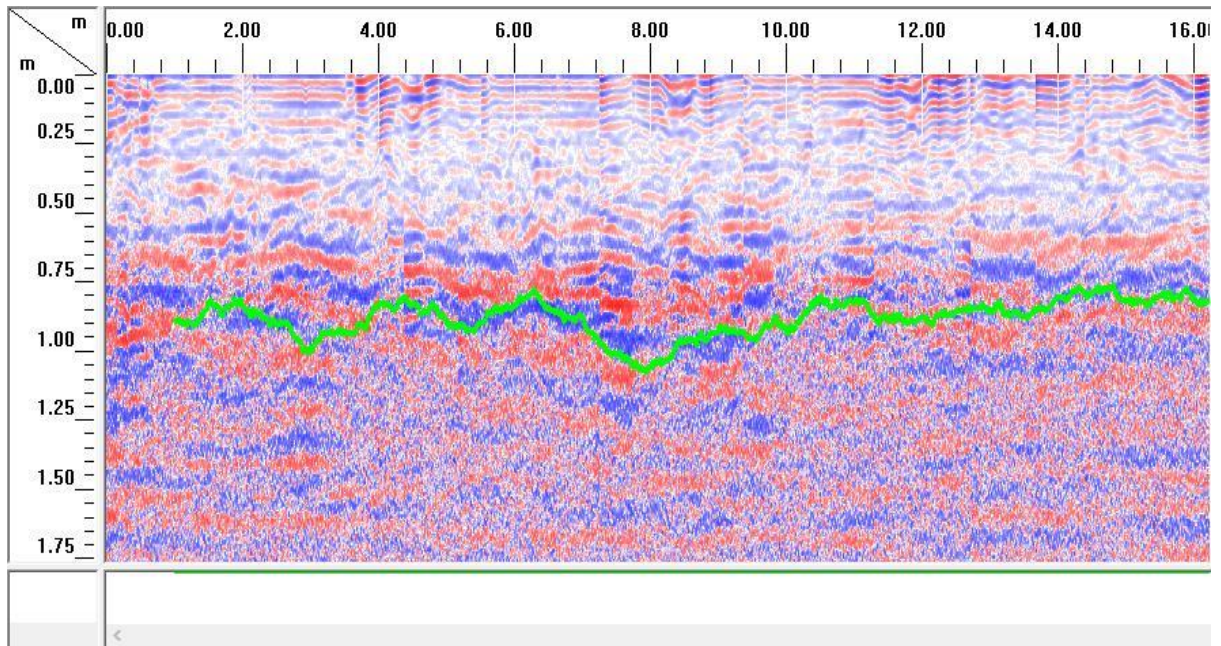


Figura 2. Radargrama área BV06 obtido com antena de 900 MHz. Linha verde: profundidade de leitura confiável.

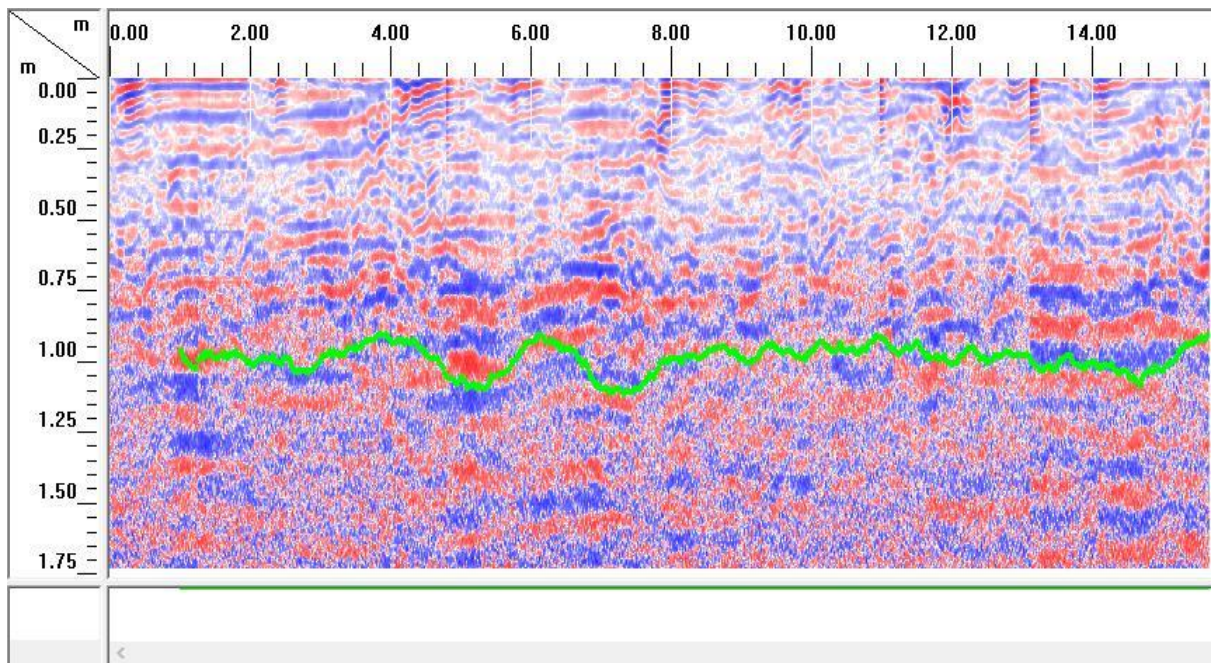


Figura 3. Radargrama área BA08 obtido com antena de 900 MHz. Linha verde: profundidade de leitura confiável.

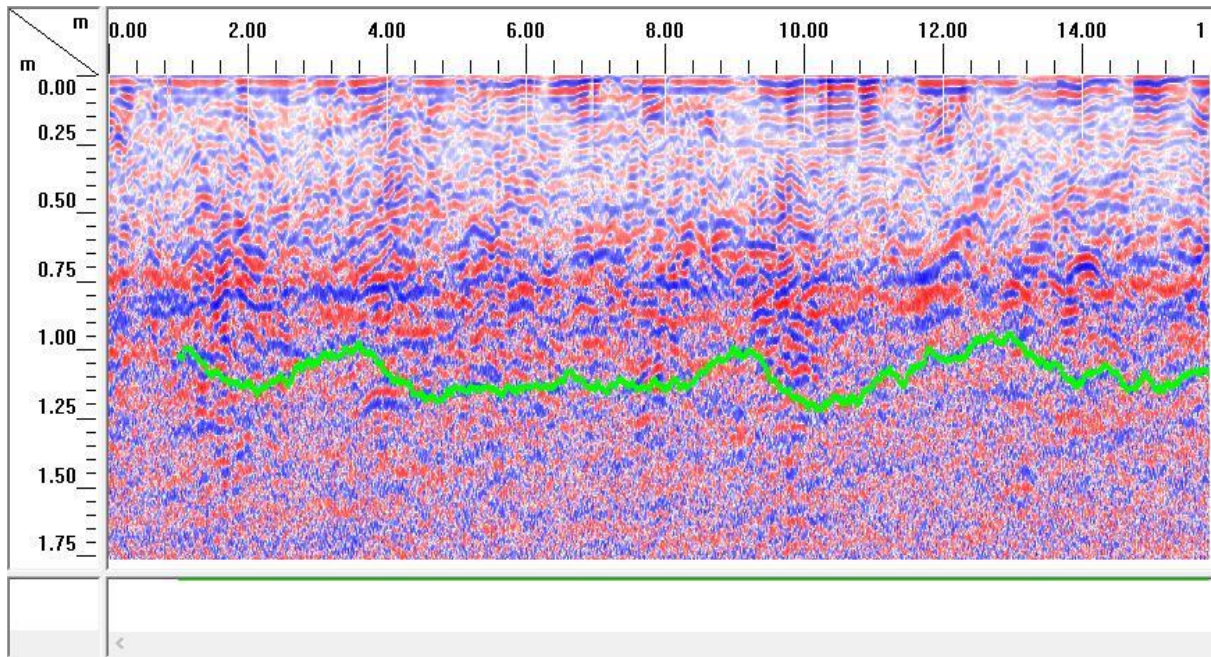


Figura 4. Radargrama área BV15 obtido com antena de 900 MHz. Linha verde: profundidade de leitura confiável.

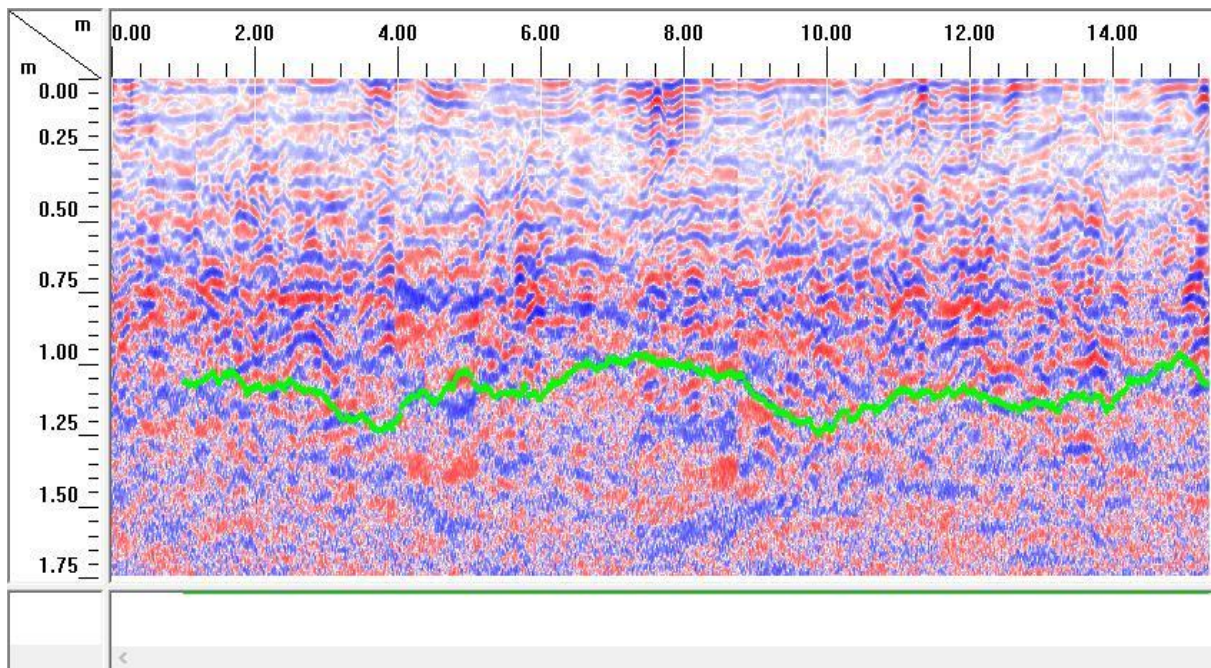


Figura 5. Radargrama área BV09 obtido com antena de 900 MHz. Linha verde: profundidade de leitura confiável.