



**FERNANDES ANTÔNIO COSTA PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE  
SULCOS DE PLANTIO EM CAMBISSOLO MANEJADO NA  
CAFEICULTURA**

**LAVRAS-MG  
2021**

**FERNANDES ANTÔNIO COSTA PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE SULCOS DE PLANTIO EM  
CAMBISSOLO MANEJADO NA CAFEICULTURA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, área de  
concentração em Recursos  
Ambientais e Uso da Terra, para a  
obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva  
Orientador  
Prof. Dr. Geraldo Cesar de Oliveira  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Pereira, Fernandes Antônio Costa.

Avaliação da Fertilidade Físico-Hídrica de Sulcos de Plantio  
em Cambissolo Manejado na Cafeicultura / Fernandes Antônio  
Costa Pereira. - 2021.

74 p. : il.

Orientador(a): Bruno Montoani Silva.

Coorientador(a): Geraldo Cesar de Oliveira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Física do Solo. 2. Cambissolo. 3. Cafeicultura. I. Silva,  
Bruno Montoani. II. de Oliveira, Geraldo Cesar. III. Título.

**FERNANDES ANTÔNIO COSTA PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE SULCOS DE PLANTIO EM  
CAMBISSOLO MANEJADO NA CAFEICULTURA**

**EVALUATION OF PHYSICAL AND HYDRIC FERTILITY OF PLANTING  
FURROWS IN INCEPTISOL MANAGED IN COFFEE GROWING**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, área de  
concentração em Recursos  
Ambientais e Uso da Terra, para a  
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de setembro de 2021.

Dr. Eduardo Costa Severiano

IF GOIANO

Dr. Sergio Henrique Godinho Silva

DCS/ESAL – UFLA

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva  
Orientador  
Prof. Dr. Geraldo Cesar de Oliveira  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

## AGRADECIMENTOS

Grato à Escola de Ciências Agrárias de Lavras da Universidade Federal de Lavras – ESAL/UFLA, pela oportunidade de estudo e aperfeiçoamento profissional e pessoal recebida.

Às agências de fomento CAPES, FAPEMIG e, em especial, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio na realização do presente trabalho e pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Departamento de Ciência do Solo – DCS e todos os seus colaboradores pelos serviços prestados, em especial a Dulce, Doroteo, Dirce, Maria Alice e Pesão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e todo seu corpo docente pelo conhecimento transmitido, em especial, aos professores Dr. Bruno Montoani Silva e Dr. Geraldo Cesar de Oliveira, pela orientação e motivação.

Aos membros da banca avaliadora, por toda contribuição para melhoria do presente trabalho.

À Fazenda Frade e seus colaboradores por possibilitarem a condução do experimento em sua lavoura.

Aos amigos do DCS e demais departamentos da UFLA, Ana Luiza Fortes, André Silveira, Betsy Páez, Brenda Bueno, Bruna Ortiz, Davi Tavares, Devison Peixoto, Emmeline França, Érika Andressa, Fábio Bispo, Lais Lemos, Lázaro Mosa, Letícia Maciente, Leonardo Sarkis, Marina Monteiro, Monna Lysa Santana, Patrini Feitosa, Pedro Antônio Benevenuto, Raphael Passaglia, Rafael Matias, Remédios Sanchez, Tales Emanuel, Vanessa Lopes e Willian Santiago.

Aos meus pais, Benedito Pereira Neto e Zélia Costa Pereira, e meu irmão Thalís Gudryan Costa Pereira, por todo apoio recebido, por sempre me incentivarem e por acreditarem em mim.

Ao Universo...

**Muito Obrigado!**

## RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de café, com expressiva contribuição para economia nacional. Apesar disso, a produção brasileira enfrenta desafios, como a ocorrência de períodos prolongados de estiagem e a expansão de lavouras cafeeiras em solos considerados de baixa aptidão agrícola, como os Cambissolos. Lavouras sobre esta classe de solo estão sujeitas a perdas de produção devido à sua baixa fertilidade físico-hídrica, sobretudo quando não manejadas adequadamente. O preparo mecânico do sulco de plantio, como parte de um sistema de manejo, constitui uma etapa crucial para o adequado estabelecimento da cultura. Avaliações de qualidade física do solo a longo prazo nesses sistemas de preparo ainda são requeridas para a correta recomendação técnica. No entanto, essas avaliações geralmente demandam grande número de amostras, o que além de oneroso, pode causar a destruição do corpo sob estudo, podendo inviabilizar pesquisas de longa duração. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar as condições físicas de sulcos de plantio de cafeeiro através de métodos menos invasivos e destrutivos. O experimento foi instalado em área localizada no município de Nazareno-MG. O plantio foi realizado no dia 23 de dezembro de 2015, com a cultivar Catuaí Vermelho – IAC 99 (*Coffea arabica* L.). O espaçamento adotado foi de 3,6 m entre linhas e 0,75 m entre plantas. Para abertura dos sulcos de plantio, que distingue os tratamentos, foram utilizados três tipos de implementos: no T40 foi utilizado um sulcador para o preparo do solo até 40 cm de profundidade; para o T60 foi utilizado um preparador para revolvimento do solo (mix) até 60 cm; e no T80 foi utilizado um subsolador para preparo até 80 cm e mix para revolvimento do solo até 60 cm. As avaliações em campo foram realizadas em dezembro de 2019, onde foi determinada a resistência à penetração de perfis de sulcos de plantio até 60 cm de profundidade com a utilização de um penetrômetro de impacto. Amostras foram coletadas para o ajuste de modelos para curva de retenção de água (*CRA*) e Intervalo Hídrico Ótimo (*IHO*) em função do Grau de compactação do solo (*GC*). Por meio das análises de penetrometria realizada em campo e em laboratório foi possível prever o *GC* desses perfis. Amostras com estrutura preservada foram coletadas em duas trincheiras escolhidas ao acaso para realizar uma análise de correlação entre os resultados observados e preditos por meio da penetrometria. Verificou-se correlação linear positiva forte ( $r = 0.81$ ). O aumento do *GC* acarretou mudanças significativas no formato das *CRAs*. O *IHO* aumentou em decorrência do aumento do *GC* até 80%. A porosidade de aeração foi o primeiro fator limitante, seguida pela impedância mecânica do solo. Valores de *GC* próximos ou acima de 88% representam uma condição de extrema limitação física. Os métodos de preparo mecânico do sulco de plantio foram determinantes para garantir uma melhor fertilidade físico-hídrica. Os tratamentos cujo preparo do sulco de plantio foi realizado com mix apresentaram maior volume de solo potencialmente explorável pelas raízes.

**Palavras-chave:** preparo profundo; qualidade física do solo; grau de compactação; intervalo hídrico ótimo.

## ABSTRACT

Brazil is the world's largest coffee producer, with an expressive contribution to its national economy. Crops implanted in soils considered of low agricultural suitability, such as an Inceptisol (*Cambissolo Háplico Distrófico*), associated with the occurrence of long periods of drought, can be a challenge for coffee production. Crops on this soil class are subject to production losses due to their low physical-hydric fertility, especially when not properly managed. Mechanical preparation of the planting furrow, as part of a management system, is a crucial step for the proper establishment of the crop. Long-term soil physical quality assessments in these tillage systems are still required for a correct technical recommendation. However, these assessments usually require a large number of samples, which, in addition to being costly, can cause destruction of the body under study, which may make long-term research unfeasible. In this context, the objective of the present work was to evaluate the physical conditions of coffee planting furrows using less invasive and destructive methods. The experiment was installed in an area located in the municipality of Nazareno-MG. Planting was carried out on December 23, 2015, with the cultivar Catuaí Vermelho – IAC 99 (*Coffea arabica* L.). The adopted spacing was 3.6 m between planting lines and 0.75 m between plants. To open the planting furrows, which distinguishes the treatments, three types of implements were used: at T40, a furrower was used to prepare the soil up to 40 cm in depth; for T60, a soil tiller (mix) up to 60 cm was used; and at T80, a subsoiler was used for preparation up to 80 cm and a mix for soil tillage up to 60 cm. Field penetration resistance assessments were carried out in December 2019, using an impact dynamic penetrometer. On the same occasion, samples were collected to adjust models for the Water Retention Curve (*CRA*) and the Least Limiting Water Range (*IHO*) as a function of the soil compaction degree (*GC*). Through the analysis of the penetrometer carried out in the field and in the laboratory, it was possible to predict the *GC* of these profiles. Undisturbed samples were collected in two randomly chosen trenches to perform a correlation analysis between the observed and predicted results by the penetrometer analysis. There was a strong positive linear correlation ( $r = 0.81$ ) between the observed degree of compaction and the predicted degree of compaction. The increase in *GC* caused significant changes in the shape of the *CRAs*. The *IHO* increased as a result of the increase in the *CG* up to 80%. Aeration porosity was the first limiting factor, followed by soil mechanical impedance. *GC* values close to or above 88% represent a condition of extreme physical limitation. All the methods used to prepare the planting furrow were crucial to ensure better physical-hydric fertility. The treatments in which the planting furrow was prepared using a mix had a greater volume of soil potentially exploitable by the roots.

**Keywords:** deep tillage; soil physical quality; degree of compaction; least limiting water range.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Limite de contração (LC) e limite de plasticidade (LP) (A), limite de liquidez (LL) (B) de um Cambissolos Háplico Distrófico.....                                                                                                                                                                                                  | 25 |
| <b>Figura 2</b> - Densidade máxima (D <sub>smax</sub> ) e umidade ótima de compactação (UOC) (C) de um Cambissolos Háplico Distrófico.....                                                                                                                                                                                                           | 26 |
| <b>Figura 3</b> - Representação da disposição dos pontos leitura de RP e dos pontos de coleta de amostras de terra para determinação de umidade.....                                                                                                                                                                                                 | 30 |
| <b>Figura 4</b> - Representação do grid de amostragem de material com estrutura preservada no perfil do sulco de plantio.....                                                                                                                                                                                                                        | 32 |
| <b>Figura 5</b> - Disposição espacial dos valores de RP, U (A) e amostras coletadas em cilindros nas trincheiras (B) em relação às plantas na linha de plantio.....                                                                                                                                                                                  | 33 |
| <b>Figura 6</b> - Grau de compactação e curvas de retenção de água em um Cambissolo Háplico Distrófico de textura franco argilosa. Área colorida nas curvas de retenção (B) representa intervalo de confiança de bootstrap (95%).....                                                                                                                | 36 |
| <b>Figura 7</b> - Porosidade total e classes de poros de um Cambissolo Háplico Distrófico em função do grau de compactação (GC). Letras minúsculas comparam uma mesma classe de poros para diferentes GC, onde médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5%).....                                           | 37 |
| <b>Figura 8</b> - Intervalo hídrico ótimo em um Cambissolo Háplico Distrófico de textura franco argilosa manejado sob lavoura cafeeira no Município de Nazareno – MG.....                                                                                                                                                                            | 39 |
| <b>Figura 9</b> - Curva de resistência à penetração de um Cambissolo Háplico Distrófico sob lavoura cafeeira localizada no Município de Nazareno, na região dos Campos das Vertentes em Minas Gerais.....                                                                                                                                            | 41 |
| <b>Figura 10</b> - Fissura causada pela inserção da haste de penetrógrafo de bancada em amostra de um Cambissolo Háplico Distrófico em condição de umidade abaixo do limite de contração ( $U < 0,20 \text{ g g}^{-1}$ ) (A); RP em condições decrescentes de umidade em amostra coletada em cilindro de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro (B)..... | 42 |
| <b>Figura 11</b> - Resistência à penetração (RP) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + sulcador (40cm).....                                                                                                                                              | 43 |
| <b>Figura 12</b> - Resistência à penetração (RP) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix(60cm).....                                                                                                                                                    | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 13</b> - Resistência à penetração (RP) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix (60cm) + subsolador (80cm). .....                                                                                                                   | 45 |
| <b>Figura 14</b> - Umidade gravimétrica observada durante teste de penetrometria em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico. Malhas geradas por triangulação linear de 12 pontos amostrados para cada transecto.....                                                                                    | 47 |
| <b>Figura 15</b> - Grau de compactação observado ( $GCo$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: (T40b) grade aradora (20cm) + sulcador (40cm); (T60a) grade aradora (20cm) + mix(60cm).....                                                                          | 48 |
| <b>Figura 16</b> - Intervalo hídrico ótimo observado (IHOo) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: (T40b) grade aradora (20cm) + sulcador (40cm); (T60a) grade aradora (20cm) + mix(60cm).....                                                                         | 49 |
| <b>Figura 17</b> - Correlação entre o grau de compactação observado pela amostragem de material com estrutura preservada nas trincheiras ( $GCo$ ) e o grau de compactação predito pela CRPu ( $GCp$ ).....                                                                                                                                | 50 |
| <b>Figura 18</b> - Grau de compactação predito ( $GCp$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + sulcador (40cm).....                                                                                                                            | 52 |
| <b>Figura 19</b> - Grau de compactação predito ( $GCp$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix(60cm). .....                                                                                                                                | 53 |
| <b>Figura 20</b> - Grau de compactação predito ( $GCp$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix (60cm) + subsolador (80cm). .....                                                                                                           | 54 |
| <b>Figura 21</b> - Ocorrência de valores de intervalo hídrico ótimo (IHO) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: (T40) grade aradora (20cm) + sulcador (40cm); (T60) grade aradora (20cm) + mix(60cm); (T80) grade aradora (20cm) + mix(60cm) + subsolador (80cm)..... | 55 |
| <b>Figura 22</b> - Intervalo hídrico ótimo (IHO) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + sulcador (40cm).....                                                                                                                                    | 57 |
| <b>Figura 23</b> - Intervalo hídrico ótimo (IHO) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix(60cm). .....                                                                                                                                        | 58 |

|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 24</b> - Intervalo hídrico ótimo (IHO) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix (60cm) + subsolador (80cm). ..... | 59 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> - Estimativas dos parâmetros da equação van Genuchten ajustada para amostras de um Cambissolo Háplico Distrófico com diferentes graus de compactação. .... | 35 |
| <b>Tabela 2</b> - Estimativas dos parâmetros de ajuste das equações utilizadas para determinação do Intervalo Hídrico Ótimo em Cambissolo Háplico Distrófico.....          | 38 |
| <b>Tabela 3</b> - Estimativas dos parâmetros de ajuste do modelo aplicado à curva de resistência à penetração de um Cambissolo Háplico Distrófico. ....                    | 41 |

## SUMÁRIO

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....                                                                   | 13 |
| 2     | Hipótese.....                                                                     | 14 |
| 3     | Objetivo geral.....                                                               | 15 |
| 3.1   | Objetivos Específicos .....                                                       | 15 |
| 4     | REFERENCIAL TEÓRICO .....                                                         | 15 |
| 4.1   | Cafeicultura .....                                                                | 15 |
| 4.2   | Cambissolos .....                                                                 | 17 |
| 4.3   | Preparo do Solo.....                                                              | 18 |
| 4.4   | Penetrometria.....                                                                | 20 |
| 4.5   | Grau de Compactação do Solo.....                                                  | 22 |
| 4.6   | Intervalo Hídrico Ótimo.....                                                      | 22 |
| 5     | MATERIAL E MÉTODOS .....                                                          | 24 |
| 5.1   | Descrição da Área de Estudo .....                                                 | 24 |
| 5.2   | Montagem do Experimento.....                                                      | 24 |
| 5.3   | Consistência e Grau de Compactação do Solo .....                                  | 25 |
| 5.4   | Calibração.....                                                                   | 26 |
| 5.4.1 | Retenção de Água no Solo .....                                                    | 27 |
| 5.4.2 | Intervalo Hídrico Ótimo.....                                                      | 28 |
| 5.5   | Penetrometria em Campo .....                                                      | 29 |
| 5.6   | Predição da Densidade do Solo ( $D_{sp}$ ) nos Perfis dos Sulcos de Plantio ..... | 30 |
| 5.7   | Validação em Campo da $D_{sp}$ por Meio da Amostragem em Trincheiras .....        | 31 |
| 5.8   | Recursos Computacionais e Análises de Dados .....                                 | 32 |
| 6     | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                       | 34 |
| 6.1   | Retenção de Água no Solo .....                                                    | 34 |
| 6.2   | Intervalo Hídrico Ótimo.....                                                      | 38 |
| 6.3   | Curva de Resistência do Solo à Penetração.....                                    | 40 |
| 6.4   | Resistência à Penetração dos Perfis de Sulco de Plantio .....                     | 42 |
| 6.5   | Grau de Compactação e Intervalo Hídrico Ótimo Observado.....                      | 47 |
| 6.6   | Correlação entre Grau de Compactação Predito e Observado .....                    | 49 |
| 6.7   | Avaliação dos Tratamentos.....                                                    | 55 |

|          |                                        |           |
|----------|----------------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>                 | <b>61</b> |
| <b>8</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>61</b> |
| <b>9</b> | <b>APÊNDICES .....</b>                 | <b>71</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, com destaque para o Estado de Minas Gerais que possui maior parque cafeeiro nacional (CONAB, 2020). A incorporação de novas áreas para cultivo e a competição com outras culturas, como soja e milho, têm levado ao estabelecimento de lavouras cafeeiras em áreas de solos com baixa aptidão agrícola. Estudos realizados no início da década passada revelaram que 70% das lavouras cafeeiras no Estado estavam implantada sobre Latossolos, 20% em Argissolos, e 10% em áreas de ocorrência de Cambissolos (BERNARDES et al., 2012). Esta última classe de solo, entretanto, pode ser considerada marginal para exploração com a cultura devido a limitações químicas e físico-hídricas (LEPSCH, 2010). No município de Nazareno, localizado na mesorregião dos Campos das Vertentes, o percentual de lavouras sobre Cambissolos é ainda maior, aproximadamente 30% (HORTA et al., 2009), o que chama a atenção para a necessidade de estudos detalhados referentes à adequação de manejo nesses solos.

Como principais obstáculos para exploração desses solos destacam-se: ocorrência em relevos movimentados; pouca profundidade efetiva de desenvolvimento radicular; pequeno armazenamento de água disponível; susceptibilidade ao selamento da camada superficial (encrostamento), o que associado a baixa permeabilidade desses solos e chuvas erosivas, potencializam o deflúvio superficial e conseqüentemente os processos erosivos. Lavouras sobre esta classe de solo estão sujeitas a perdas de produção por estresse hídrico, sendo este um dos principais fatores que afetam o desenvolvimento e produtividade da cultura (DAMATTA; RAMALHO, 2006).

Práticas que visem mitigar efeitos negativos de déficit hídrico são essenciais e determinantes, sobretudo em cultivos de sequeiro. Dessa forma, estudos vêm sendo realizados com intuito de melhorar a fertilidade físico-hídrica pelo sistema de preparo do solo (DALMAGO et al., 2009; SERAFIM et al., 2011). Na cafeicultura tem sido sugerido o preparo de sulcos profundos para o plantio, por promover alterações benéficas na estrutura e configuração do espaço poroso e romper camadas adensadas que limitam o crescimento radicular (BARBOSA et al., 2020; SERAFIM et al., 2011, 2013a; SILVA et al., 2021).

Essas intervenções podem causar mudanças na densidade do solo, que por sua vez, está relacionada com múltiplos parâmetros, sejam de caráter físico, químico ou biológico. Assim, a densidade do solo, tem sido utilizada como indicador de qualidade física, sendo considerada uma das principais propriedades do solo. Se tratando de qualidade física do solo, diversos modelos e índices têm sido propostos na literatura para tal avaliação. Um desses modelos com

especial destaque é o Intervalo Hídrico Ótimo (SILVA; KAY; PERFECT, 1994), que possui a vantagem de unir em um único parâmetro informações sobre a disponibilidade de água para as plantas, limitações de aeração e resistência à penetração do solo (LEÃO et al., 2004; SILVA; KAY, 1996). Outro parâmetro para avaliação do solo é o Grau de Compactação (GC), que reflete os impactos do manejo sobre sua qualidade física (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; SUZUKI et al., 2007).

No entanto, o solo, especialmente o sulco de plantio, pode ser um ambiente caracterizado por grande heterogeneidade estrutural, tendo em vista os diferentes tipos de solo e os métodos mecânicos de preparo (SCHNEIDER et al., 2017; SILVA et al., 2021). Assim, identificar a profundidade efetiva de preparo, bem como o volume de solo potencialmente explorável pelas raízes demanda um grande número de amostras. Essa prospecção de dados geralmente é uma operação laboriosa, sobretudo em profundidades abaixo da camada arável. Para a obtenção de uma maior densidade de observações em campo são requeridas amostragens em grande quantidade, o que além de oneroso, causa expressiva perturbação no corpo sob estudo (TABBAGH et al., 2000).

Métodos minimamente invasivos podem ser uma opção para viabilizar essas avaliações em grandes áreas. De tal forma, esses métodos devem ser representativos, economicamente viáveis e de fácil realização, seja em campo ou em laboratório. Uma alternativa é a utilização da penetrometria para avaliar a qualidade estrutural do solo, tendo como base a caracterização do seu comportamento físico-hídrico em relação à resistência à penetração, umidade e sua densidade.

Diante do exposto, faz-se necessário estudos mais aprofundados relacionados à duração dos efeitos do preparo profundo dos sulcos de plantio na mencionada classe de solo, considerando a importância da cafeicultura na economia nacional. Além disso, a busca por metodologias que permitam a obtenção de uma maior densidade de informação de forma minimamente intrusiva e destrutiva é crucial para obtenção de dados de forma mais eficiente, beneficiando assim, a pesquisa e produtores.

## **2 HIPÓTESE**

A utilização de análises de penetrometria realizadas sob condições de campo e laboratório, juntamente com a caracterização físico-hídrica do solo, é uma alternativa viável para avaliar a qualidade estrutural de sulcos de plantio de forma minimamente invasiva e destrutiva.

### 3 OBJETIVO GERAL

Avaliar as condições físicas de sulcos de plantio de cafeeiro por meio de métodos menos invasivos e destrutivos após quatro anos de implantação de lavoura.

#### 3.1 Objetivos Específicos

Realizar a caracterização dos atributos físicos do solo correlatos ao grau de compactação, retenção e disponibilidade de água, aeração e resistência à penetração.

Determinar a resistência à penetração em pontos dispostos em transectos perpendiculares à linha de plantio do cafeeiro nos diferentes tratamentos.

Estimar a densidade do solo bem como grau de compactação e intervalo hídrico ótimo ao longo de todo perfil dos sulcos de plantio.

Coletar e analisar material com estrutura preservada provenientes dos perfis dos sulcos de plantio para validação das estimativas.

### 4 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 4.1 Cafeicultura

Dentre as espécies do gênero *Coffea* duas se destacam pela sua importância comercial - *Coffea arabica* L. (café arábica) e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner (café conilon) – sendo essas, as mais consumidas no mundo. No Brasil, a cafeicultura começou a despontar como fonte de riqueza na primeira metade do século XIX, tendo grande importância histórica, seu contexto produtivo esteve intimamente atrelado à questões políticas e sociais (FURTADO, 2005). Além do saldo positivo na balança comercial brasileira, a cafeicultura é uma fonte de empregos, principalmente os diretos, contribuindo também para a manutenção do trabalhador no meio rural (MOREIRA et al., 2019). Atualmente, a cafeicultura segue com sua relevância econômica, e apesar do registro de uma sensível redução na área de cultivo, houve um aumento na produção nos últimos anos, fato este decorrente de ganhos em produtividade (MOREIRA et al., 2019).

O maior produtor mundial de café é o Brasil, com uma produção média anual de 53 milhões de sacas (60 kg) nos anos cafeeiros entre 2013/14 e 2018/19, seguido pelo Vietnã (28 milhões sacas), Colômbia (14 milhões de sacas), Indonésia (12 milhões de sacas) e Etiópia (7 milhões de sacas) (ICO, 2019). Em 2020, segundo o quarto levantamento anual da Companhia Nacional de abastecimento, 63,08 milhões sacas de café foram beneficiadas, representando um aumento 27,9% em relação 2019 e 2,3% em relação a 2018 (CONAB, 2020). Com a influência de biennialidade negativa, a segundo levantamento da safra de 2021 indica uma redução de

22,6% em relação à safra atual (CONAB, 2021). No país, o Estado de Minas é o maior produtor do grão, seguido pelo Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia e Paraná (SARAIVA et al., 2018).

O verão quente e úmido e inverno ameno e seco são propícios para qualidade e produção do café, condições encontradas, sobretudo, no Cerrado mineiro. Aliado às condições climáticas favoráveis, o sucesso da cultura no Estado se deve à modernização das lavouras, com mecanização, manejo de adubação e irrigação, quando possível (FERNANDES et al., 2012). As oscilações na produção do café são decorrentes da própria biannualidade do cafeeiro (MENDONÇA et al., 2011; RENA; MAESTRI, 1985), e de fatores de ordem climática, como o regime de chuvas e temperatura (CAMARGO, 2010). Tal influencia se expressa principalmente na sincronização de floradas, e pela ocorrência de estresse hídrico.

Em locais com pequena a variação no fotoperíodo, regiões equatoriais por exemplo, o cafeeiro não apresenta estação de florescimento bem definida, onde os dias sempre curtos representam uma condição de indução contínua à floração (DE CAMARGO, 1985). Nessas condições, o florescimento e frutificação é condicionado pelo ciclo hidrológico. No Brasil, comumente, a ocorrência do florescimento do cafeeiro é associado à um período de déficit hídrico seguido por irrigação ou precipitações (CAMARGO; CAMARGO, 2001; DO NASCIMENTO et al., 2008).

A sincronização da florada é determinante na produção, uma vez que condiciona a qualidade e a quantidade do grão colhido (DAMATTA et al., 2007). Além disso, a sincronização permite que o desenvolvimento e maturação dos frutos ocorra durante condições climáticas favoráveis. Apesar de se almejar o período reprodutivo (floração, granação e maturação) em épocas de maior disponibilidade hídrica, as lavouras estão sujeitas à períodos de estiagem. Em 2019, por exemplo, um veranico de aproximadamente 40 dias ocorrido nas primeiras semanas do ano, prejudicou o crescimento dos frutos, ocasionando menor rendimento, com elevado número grãos pequenos, mal formados, chochos e de casca grossa (CONAB, 2019).

A suplementação hídrica, por meio de sistemas de irrigação, em contraponto à períodos de estiagem, tem se mostrado promissora na cafeicultura com aumento na produtividade (FERNANDES et al., 2012; PERDONÁ et al., 2012). Entretanto, a adoção de irrigação é dependente, além de recursos econômicos, da própria disponibilidade de água (PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000). Nesse sentido, produtores e pesquisadores têm buscado por alternativas à estas adversidades, como o uso de genótipos mais resistentes, adoção de culturas

de cobertura nas entrelinhas, adensamento de plantas e preparo profundo do sulco de plantio (BARBOSA et al., 2020; SCHNEIDER et al., 2017; SERAFIM et al., 2011).

## 4.2 Cambissolos

Em escala nacional, os Cambissolos ocupam pouco mais de 5% do território brasileiro (SANTOS et al., 2011). No entanto, segundo levantamento, no Estado de Minas Gerais, os Cambissolos representam uma área de 10.464.438 hectares, equivalentes a cerca de 18% da superfície do Estado, com notada ocorrência nas regiões do Alto Paranaíba e Alto São Francisco (AMARAL et al., 2004), mas também na Região dos Campos das Vertentes, onde foi montada área experimental do presente estudo. Na cafeicultura, Bernardes et al. (2012) realizaram um estudo sobre a distribuição das lavouras no Estado de Minas Gerais. Na época, os autores verificaram que cerca de 90% das lavouras estavam implantadas sobre Latossolos e Argissolos. Ainda segundo esses autores, das três classes de solos predominantes sob lavouras de café, cerca de 10% estavam situadas em áreas de ocorrência de Cambissolo.

Do ponto de vista pedogenético, os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos, podendo apresentar características inerentes ao material de origem pela presença de minerais primários facilmente intemperizáveis (RESENDE et al., 2014). Seu ambiente típico de ocorrência no estado de Minas Gerais se encontra em áreas de relevo ondulado a forte ondulado. Geralmente, são solos pouco profundos e podem apresentar valores elevados de silte, que devido ao seu pequeno tamanho (0,05 a 0,002 mm) e baixa capacidade de agregação, pode levar ao entupimento de poros, diminuindo sua permeabilidade (BRANDÃO et al., 2006). Altos teores de silte no solo aumentam a ocorrência de selamento superficial (encrostamento), diminuindo a capacidade de infiltração (RESENDE et al., 2014). Segundo Lepsch (2010) esses fatores somados contribuem para sua notada susceptibilidade à erosão hídrica.

Embora sejam reconhecidas as limitações agronômicas de solos pertencentes a essa classe, muitas áreas de Cambissolos estão inseridas no contexto produtivo agrícola, em culturas como: soja, milho e feijão (ANDRADE et al., 2012); bananeira (MOTA; DE ALENCAR; DE ASSIS JÚNIOR, 2015); pinus (PFLEGER; CASSOL; MAFRA, 2017); eucalipto (ANDRADE et al., 2017; AVANZI et al., 2011; GATTO et al., 2010); cana-de-açúcar (BUSATO; CANELLAS; VELLOSO, 2005). A obtenção de resultados positivos na exploração desses solos é condicionada a implementação de um manejo adequado, adotando práticas conservacionistas como terraceamento e manutenção da cobertura do solo.

Em determinadas situações, com culturas específicas e manejo adequado, os Cambissolos podem até se sobressair em alguns parâmetros quando comparados a solos tidos

como de melhor qualidade física. Isto foi observado por Severiano et al. (2009), que avaliando o potencial de uso de solos para a cultura da cana-de-açúcar, verificaram que o Cambissolo, naquelas condições de estudo, apresentou maior capacidade de água disponível quando comparado a um Latossolo. Tal conclusão fundamentou-se na estrutura desses solos, tendo em vista o arranjo em blocos dos agregados no Cambissolo permitir maior retenção de água e maior resistência à compactação quando comparado à estrutura granular do Latossolo.

Serafim et al. (2013b) comparando Latossolos e Cambissolos sob lavouras cafeeiras em sistema conservacionista, concluíram que o sulcamento para o plantio, com revolvimento até 0,6 m, resultou em alterações positivas nos parâmetros físicos desses solos, com incremento no potencial de uso dos Cambissolos. Dessa forma, ressalta-se que apesar de suas restrições ao uso agrícola, sob manejo adequado, os Cambissolos apresentam potencial para produção, inclusive podendo ter suas propriedades físicas e químicas melhoradas (AVANZI et al., 2011; BARBOSA et al., 2020; SERAFIM et al., 2013a; SEVERIANO et al., 2009).

### **4.3 Preparo do Solo**

O preparo mecânico do solo objetivando a produção agrícola, propicia o condicionamento de suas propriedades físicas afim de permitir adequado desenvolvimento vegetal (TORMENA et al., 2002). Consiste na movimentação de massa de terra por meio do uso de aparatos mecânicos, resultando em modificações na estrutura, porosidade e densidade do solo (CUNHA et al., 2010). Entretanto, normalmente não é realizado em profundidade e a restrição ao acesso de recursos armazenados no subsolo pode resultar em severa depressão do rendimento vegetal (SCHNEIDER et al., 2017). Um dos efeitos almejados no preparo do solo é a redução da resistência a penetração de raízes, cujo impedimento mecânico pode ser de origem pedogenética (adensamento) ou causado por manejo inadequado (compactação).

A reorganização do volume do solo, seja por afrouxamento ou por revolvimento da massa de terra, influi diretamente sobre as propriedades físicas do solo. Tal influência se processa no sentido de alterações no tamanho, forma, organização, conectividade e distribuição de poros, modificando por consequência, o perfil da curva de retenção de água no solo, capacidade de infiltração e drenagem (KAY; VANDENBYGAART, 2002). Essas alterações promovidas nos espaços porosos também afetam a dinâmica de trocas de gases entre o solo e a atmosfera, principalmente pelas modificações na macroporosidade (RODRIGUES et al., 2011). Na maioria das culturas agrícolas, as plantas não toleram condições de encharcamento do solo, devido à baixa difusão do oxigênio na água, essencial para respiração das raízes. Assim, é fundamental que haja no solo uma porosidade de aeração (KLEIN; LIBARDI, 2002).

O preparo do solo, no entanto, quando realizado de maneira inadequada pode acarretar grandes perdas, sejam elas de ordem econômica ou ambiental, impactando inclusive no estoque carbono do solo (SILVA et al., 2017b). Os maiores prejuízos no Brasil são traduzidos em erosão hídrica e compactação do solo (ALMEIDA et al., 2019; DIAS JUNIOR et al., 2003; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; RAMOS et al., 2013). Em culturas perenes, o preparo do solo para plantio é fator determinante, visto que a planta permanecerá no campo por anos a fio. O adequado preparo do sulco de plantio se torna ainda mais relevante no que concerne à exploração de regiões onde a seca edafológica possa ser uma limitação para produção vegetal.

Na cafeicultura do Estado de Minas Gerais, as lavouras têm se expandido para regiões onde o regime de chuvas é concentrado em alguns meses do ano, caracterizando um desafio para produtores (BERNARDES et al., 2012). Além disso, cada vez mais solos tidos como de baixa aptidão para cultura tem sido incorporados às plantações, como é o caso dos Cambissolos (BARBOSA et al., 2020). Em busca por alternativas para mitigar perdas por estresse hídrico no cafeeiro, produtores, técnicos e pesquisadores vem desenvolvendo sistemas de manejo capazes de propiciar a exploração viável de áreas antes consideradas marginais.

Um desses sistemas foi descrito por Serafim et al. (2011), o sistema conhecido com AP Romero é caracterizado, dentre outras coisas, pela aplicação de altas doses de gesso, cultivo de braquiária nas entrelinhas, plantio semiadensado e preparo do sulco de plantio com correção química até 0,6 m de profundidade. O preparo profundo do sulco de plantio aumenta a viabilidade de produção em locais onde o solo pode apresentar alguma restrição ao desenvolvimento de raízes e em regiões com chuvas irregulares e períodos secos pronunciados (SCHNEIDER et al., 2017). O condicionamento físico e químico proporcionado por esses sistemas possibilita um bom desenvolvimento radicular, permitindo a exploração de um maior volume de solo e a absorção de água em camadas mais profundas (BARBOSA et al., 2020; SERAFIM et al., 2011, 2013a).

Entretanto, após o preparo a massa revolvida de solo tende a se reorganizar, atingindo um novo estágio de equilíbrio. A magnitude desse processo é variável conforme a mineralogia do solo, estrutura, ciclos de umedecimento e secagem, atividade de microrganismos, manejo e tempo (BERTOL et al., 2000, 2004; SILVA et al., 2017a; VIANA; FERNANDES FILHO; SCHAEFER, 2004). Assim, trabalhos que visem a obtenção de informações sobre a duração dos efeitos do preparo do solo são necessários para a correta recomendação técnica, sobretudo em lavouras perenes.

#### 4.4 Penetrometria

Na ciência do solo, a penetrometria é a avaliação da resistência do solo à penetração (*RP*). Entende-se por *RP* a força contrária exercida pela matriz do solo em resposta à deformações decorrentes do crescimento radicular ou inserção de aparatos mecânicos (MEDINA; CAMACHO-TAMAYO; CORTÉS, 2012). A *RP* reflete os efeitos combinados da textura, estrutura, agregação, umidade e densidade do solo (CORADO NETO et al., 2015; MOME FILHO et al., 2014; TORMENA et al., 2002). No entanto, as discussões em torno da *RP* convergem, majoritariamente, para a relação entre a densidade e a umidade do solo.

De forma geral, observa-se que maiores valores de *RP* tendem a ocorrer quando o solo apresenta maior densidade e menor umidade (SANTOS; DE JESUS; VALENTE, 2012). De maneira oposta, com o aumento na umidade, ocorre o decréscimo das forças de coesão entre as partículas do solo, além de propiciar uma diminuição do atrito interno, resultando assim, na diminuição da *RP* (CUNHA; VIEIRA; MAGALHÃES, 2002). A relação entre *RP*, umidade e densidade pode ser descrita por meio da curva de resistência a penetração do solo (*CRP*), com a aplicação e ajuste de modelos matemáticos (BLAINSKI et al., 2008; SILVEIRA et al., 2010).

Quase a totalidade das plantas terrestres, bem como as culturas agrícolas, têm o solo como um meio para desenvolvimento, fornecendo suporte físico, água, oxigênio e nutrientes (BLAINSKI et al., 2008; COLOMBI et al., 2017; LAPEN et al., 2004). Desse modo, para o sucesso de uma cultura, dentre outras condições, o solo deve ser capaz permitir o desenvolvimento adequado do sistema radicular. Uma *RP* muito elevada limita a exploração pelas raízes de um maior volume de solo, podendo levar a planta a sofrer por estresse hídrico, nutricional ou mesmo acarretar seu tombamento.

A penetrometria tem sido utilizada na avaliação da qualidade física do solo, como por exemplo, no diagnóstico de compactação (BERGAMIN et al., 2010; CORADO NETO et al., 2015; OTTO et al., 2011). A qualidade física do solo, além de ser dependente da pedogênese, é também dependente do manejo adotado, sendo este último, crucial para a manutenção de sistemas produtivos (HUBERT et al., 2007; TORMENA et al., 2002). Blainiski et al. (2008) por meio da utilização da *CRP*, constataram que a *RP* foi modificada pelos sistemas de uso e manejo, indicando que em solos compactados é necessário maior umidade para manter a *RP* em níveis adequados ao crescimento das plantas.

Imhoff, da Silva e Tormena (2000) utilizaram a *CRP* na avaliação sistema de pastejo intensivo rotacionado com capim-elefante e identificaram áreas potencialmente limitantes ao crescimento radicular. Ralisch et al. (2008) avaliaram diferentes sistemas de manejo e verificaram que os primeiros dois anos de implantação do sistema de plantio direto é um período

crítico quanto à *RP* nas camadas superficiais do solo. Esses autores, de forma geral, concluíram que a *RP* é uma ferramenta útil para orientar as práticas de manejo, visando a manutenção da qualidade física do solo.

Diversos autores ao longo do tempo têm estabelecidos valores críticos de *RP* para o desenvolvimento radicular. Entretanto, os valores críticos adotados variam conforme a cultura sob investigação, o solo e seu manejo, sendo comumente compreendidos numa faixa entre 2 e 3,5 MPa (BLAINSKI et al., 2008; IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000; LAPEN et al., 2004; LEÃO et al., 2004; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Para o cafeeiro, por se tratar de uma cultura perene e arbustiva, tem sido adotado o valor crítico de 3.0 MPa (SERAFIM et al., 2013c; SILVA et al., 2015a, 2019).

Os dispositivos utilizados na penetrometria são denominados de penetrômetros, que são aparatos dotados de uma haste com um cone na extremidade inferior. Esses equipamentos podem ser classificados conforme seu princípio de funcionamento, como estáticos ou dinâmicos: nos penetrômetros estáticos uma haste penetra o solo de forma contínua em decorrência de uma pressão exercida sobre todo o conjunto, e a *RP* é registrada em um dinamômetro (BEUTLER; CENTURION; SILVA, 2007); já os penetrômetros classificados como dinâmicos, são também conhecidos como penetrômetros de impacto, pois sua haste penetra no solo em resposta ao impacto de um peso em queda livre de uma altura constante (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983).

Em comparação entre tipos de penetrômetros, verifica-se certa diferenciação quanto aos resultados obtidos, sendo em geral, observados maiores valores de *RP* nos penetrômetros de impacto. Beutler, Centurion e Silva (2007) mostraram que em solo compactado, o penetrômetro de impacto apresentou valores de *RP* superiores quando comparados aos valores obtidos pelos penetrômetros de anel dinamométrico e eletrônico. Roboredo et al. (2010) também observaram maiores valores de *RP* obtidos pelo penetrômetro de impacto.

Diversos designs de penetrômetros estáticos estão disponíveis no mercado, sendo empregados em estudos além da ciência do solo, a exemplo, na ciência dos alimentos. Entretanto, como mencionado por Herrick e Jones (2002), os penetrômetros estáticos do tipo acionamento manual apresentam algumas limitações: são relativamente caros; precisam penetrar o solo em uma velocidade constante, estando sujeitos à variações conforme operador; necessitam ser recalibrados constantemente; e, possuem uma faixa de leitura de *RP* mais limitada comparativamente à penetrômetros dinâmicos. Essas limitações, no entanto, podem ser sanadas caso o acionamento do equipamento seja feito de forma automatizada em substituição a forma manual. Já os penetrômetros de impacto são aparatos robustos, de fácil

utilização, baixo custo e que apresentam como principal vantagem a pequena interferência do operador nos resultados (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983).

#### 4.5 Grau de Compactação do Solo

A densidade é uma das principais propriedades do solo, uma vez que está diretamente relacionada com diversos parâmetros, sejam de caráter físico, químico ou biológico, sendo frequentemente utilizada como indicador de qualidade física (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Define-se densidade do solo ( $D_s$ ) como a razão entre a massa de sólidos e seu volume total. A massa de sólidos do solo é dependente de sua textura e de sua mineralogia.

O volume ocupado por uma dada massa de sólidos, por sua vez, além de ser dependente de processos pedogenéticos é também influenciado pela ação antrópica, como o manejo agrícola (SEVERIANO et al., 2010, 2013). Tal volume decorre do arranjo espacial da massa de sólidos, caracterizando o tipo de estrutura do solo, bem como o tamanho, proporção e distribuição dos espaços vazios. Assim, estabelecer comparações de densidade entre diferentes tipos de solos pode ser uma problemática devido aos diversos fatores que podem influenciar nos resultados.

Para contornar tal empecilho, o grau de compactação solo ( $GC$ ) tem sido utilizado como indicador de qualidade física por minimizar influências decorrentes das diferenças pedogenéticas entre solos (KLEIN, 2006). O  $GC$  é a razão entre a  $D_s$  e a densidade máxima ( $D_{smax}$ ) obtida em um teste de compactação (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). A  $D_{smax}$  pode variar conforme o método utilizado nesses testes, bem como a energia aplicada para compactação (SUZUKI et al., 2007).

Um desses métodos de determinação do  $GC$  é o ensaio de Proctor Normal (BOWLES, 1986; STANCATI et al., 1981). A energia de compactação utilizada nesse ensaio é equivalente a um rolo tipo “pé de carneiro” leve (5 a 7 t), passando 12 vezes sobre uma camada de solo com 30 cm de espessura (VARGAS, 1978). Já na Agricultura, a energia de compactação representa, aproximadamente, 15 passadas de um trator com 0,727 t na roda (pressão de 140 kPa) em solo franco arenoso (RAGHAVAN et al., 1976).

#### 4.6 Intervalo Hídrico Ótimo

O estabelecimento e crescimento de plantas, bem como o desenvolvimento de uma cultura de interesse agrícola está intimamente ligada à disponibilidade hídrica. Usualmente, a água disponível às plantas é considerada como sendo o conteúdo de água retida no solo, delimitado por um limite superior e inferior. Esses limites são a capacidade de campo ( $C_c$ ) e o

ponto de murcha permanente ( $Pmp$ ) (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1931), ambos de caráter teórico.

Embora haja questionamentos à respeito de sua adoção, esses conceitos são amplamente utilizados por sua praticidade técnica (AGUIAR NETTO; NACIF; REZENDE, 2014; REICHARDT, 1988). De forma simplificada, a  $Cc$  é a quantidade de água retida no solo após drenagem do excedente pela ação da gravidade (REICHARDT, 1988). Já o  $Pmp$ , apesar de ser um conceito aplicado ao solo, se baseia em princípios fisiológicos (BERNARDO, 1995), podendo ser entendido como a umidade no solo na qual as plantas não conseguem recuperar sua turgescência, mesmo após submetidas a uma condição de atmosfera saturada (BRIGGS, L. J.; SHANTZ, 1912).

Apesar da conveniência em se considerar a faixa de água disponível dentro dos limites supracitados, a reposta das plantas à disponibilidade de água no solo geralmente não ocorre de maneira tão simplista. Além de água em quantidade e qualidade, o solo deve fornecer condições propícias ao desenvolvimento das plantas. Assim, um índice de qualidade física do solo que integre os efeitos combinado da disponibilidade água, impedância mecânica e aeração do solo foi proposto por Letey (1985) (*Non Limiting Water Range*) e aprimorado por Silva et al. (1994) (*Least Limiting Water Range*). Segundo estes últimos autores, a incorporação de informações referentes à aeração, retenção de água no solo e resistência à penetração de raízes resultou em um parâmetro que é mais sensível às mudanças estruturais do solo do que o conceito clássico de água disponível.

Na literatura de ciência do solo nacional, este índice é conhecido como Intervalo Hídrico Ótimo ( $IHO$ ). Diversos trabalhos tem sido realizados aplicando tal metodologia de avaliação da qualidade física do solo. A saber, Tormena et al. (1998) conduziram estudos em um Latossolo Roxo, e verificaram que o  $IHO$  foi mais sensível às modificações estruturais decorrentes de variações na  $Ds$  do que a água disponível entre a  $Cc$  e o  $Pmp$ . Leão et al. (2004) utilizaram o  $IHO$  para avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado em um Latossolo Vermelho distrófico. Esses autores identificaram que as condições físicas do solo, mostraram-se mais restritivas no sistema de pastejo rotacionado do que no sistema de pastejo contínuo, sendo influenciadas pela maior taxa de lotação animal. Avaliando um Latossolo Vermelho após 30 anos sob sistema de plantio direto, Betioli Júnior et al. (2012) identificaram que os valores de  $IHO$  foram maiores na posição de amostragem relativa à linha plantio da cultura.

Embora seja uma metodologia eficaz na qualificação das condições físico-hídricas do solo, o  $IHO$  ainda pode apresentar limitações. O limite inferior do  $IHO$  sendo determinado pelo  $Pmp$  ou pela  $RP$  crítica podem não ser adequados em algumas situações, sobretudo em solos

com baixa  $D_s$  e elevado volume de poros de maior diâmetro (SILVA et al., 2015a). A absorção de água em solos nessas condições pode ser drasticamente reduzida antes mesmo de se atingir o  $P_{mp}$ , sendo resultado de uma baixa condutividade hidráulica em condição não saturada (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000).

Todavia, tal limitação pode ser, de certa forma contornada, como exemplo podemos citar Silva et al. (2019). Esses autores avaliando sistema de manejo no crescimento inicial do cafeeiro, incorporaram a umidade crítica para cada estágio fenológico da cultura como limite inferior do  $IHO$ . Nesse estudo foi verificado que a umidade do solo, independentemente do sistema de manejo, esteve abaixo da umidade crítica nas profundidades de 20 e 60 cm na maior parte do ano agrícola.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Descrição da Área de Estudo

As análises de campo bem como a amostragem de material para análises em laboratório foram realizadas em dezembro de 2019 em experimento instalado em uma lavoura cafeeira. O experimento foi conduzido no município de Nazareno, na região dos Campos das Vertentes em Minas Gerais (44° 39' 04" W, 21° 10' 52" S). A altitude média da área é de 935 m, sua vegetação é de campo limpo e campo cerrado. O clima local é tropical de altitude, com ocorrência de verões quentes e úmidos e invernos frescos e secos, e segundo a classificação de Köppen, o clima predominante é o Cwa com uma temperatura média anual de 19°C (ANTUNES, 1986).

A área de estudo ocupa 240 m<sup>2</sup> (24 x 10 m) e se encontra adjacente à área comercial da Fazenda Frade. O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Distrófico (SANTOS H. G. et al., 2018), estando localizado em relevo ondulado com declividade máxima de 12%. Para fins de caracterização, uma análise granulométrica foi realizada até a profundidade de 80 cm (APÊNDICE A), e os horizontes A e B apresentaram textura franco argilosa (DONAGEMMA et al., 2017).

### 5.2 Montagem do Experimento

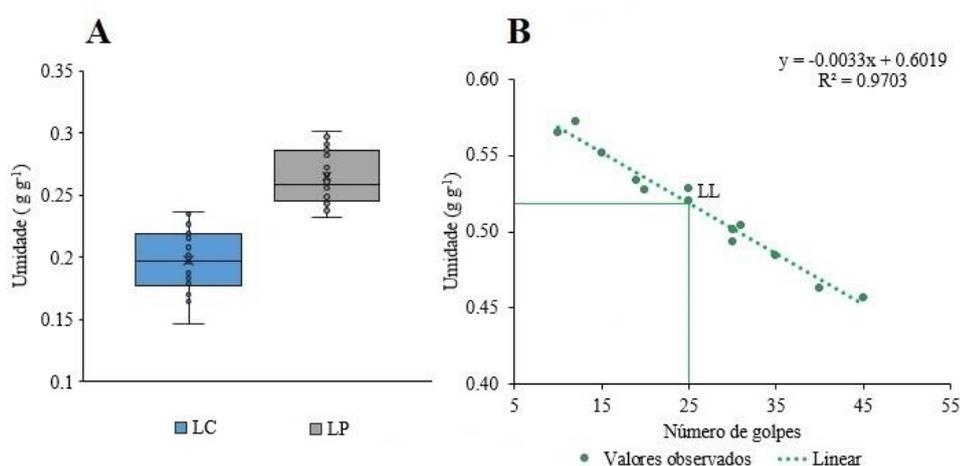
O plantio foi realizado no dia 23 de dezembro de 2015, com a cultivar Catuaí Vermelho – IAC 99 (*Coffea arabica* L.), utilizando um espaçamento de 3,6 m nas entrelinhas e 0,75 m entre plantas. O experimento consistiu de três tratamentos (T40, T60 e T80), cada um deles com uma área útil de 9 m<sup>2</sup> (9 x 1), com 12 plantas. Adotou-se delineamento experimental em blocos casualizados (a, b e c) com três repetições para cada tratamento. A implantação da área experimental é descrita em detalhes por Barbosa et al. (2020).

Foi realizado preparo do solo em área total com grade aradora (20cm) dotada de 24 discos (Santa Izabel - GASI 360). Para abertura dos sulcos de plantio, que distingue os tratamentos, foram utilizados três tipos de implementos: no T40 foi utilizado um sulcador (Kamaq) para o preparo do solo até 40 cm; para o T60 foi utilizado um preparador de solo (mix) para revolvimento até 60 cm de profundidade (Mafes – BIG MIX AS-2); no T80 foi utilizado um subsolador (Mafes – DRENO) para preparo até 80 cm e mix para revolvimento do solo até 60 cm. O preparo mecânico do solo realizado em toda área do experimento foi descrito em detalhes por Silva et al. (2021).

### 5.3 Consistência e Grau de Compactação do Solo

Na área experimental, foram coletadas aleatoriamente, amostras de solo sem estrutura preservada na camada de 0 a 30 cm para determinação dos limites de consistência e grau de compactação do solo (*GC*). O ensaio de LL foi realizado conforme a norma NBR 6459 (ABNT, 1984), já o ensaio de LP foi realizado seguindo a NBR 7180 (ABNT 1984b). O ensaio de LC e cálculo de grau de contração foi determinado segundo Dias Junior e Miranda (1998).

Foram realizados 30 ensaios de *LC*, cuja umidade média observada foi de  $0,20 \text{ g g}^{-1}$ , e para o *LP* foram realizados 29 ensaios, com umidade média de  $0,27 \text{ g g}^{-1}$  (Figura 1 A). Já o LL foi determinado a partir de 13 ensaios de Casa Grande em diferentes umidades e, a partir disso, uma equação linear foi ajustada. Assim, o LL foi observado com uma umidade  $0,52 \text{ g g}^{-1}$ , considerando 25 golpes (Figura 1 B).



**Figura 1** - Limite de contração (LC) e limite de plasticidade (LP) (A), limite de liquidez (LL) (B) de um Cambissolos Háplico Distrófico.

Para determinação do *GC* do solo foi realizado o ensaio de Proctor Normal (BOWLES, 1986; STANCATI et al., 1981) segundo a NBR 7182 (ABNT, 1986). O procedimento foi

realizado até se obter 15 pontos com umidades crescentes e suas respectivas densidades, a fim de se obter uma curva de compactação do solo (Equação 1, Figura 2):

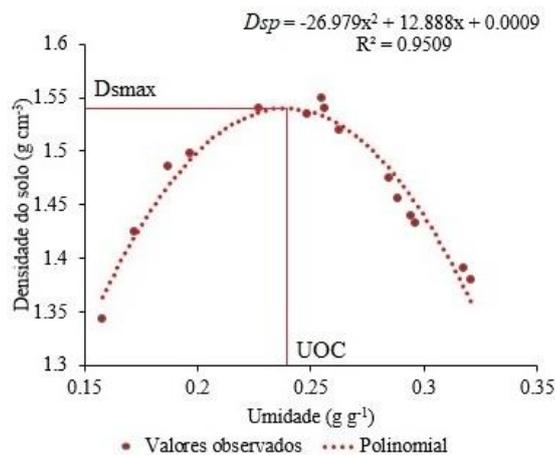
$$Ds_p = hU^2 + iU + j \quad (1)$$

onde  $Ds_p$  é a densidade do material de solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) durante os ensaios em umidades  $U$  ( $\text{g g}^{-1}$ ) crescentes;  $h$ ,  $i$  e  $j$  são parâmetros de ajuste da equação polinomial de segunda ordem. A partir da curva de compactação, foi calculada a densidade máxima de compactação (Equação 2) e a umidade ótima de compactação (Equação 3):

$$Ds_{max} = (i^2 - 4hj)/(4h) \quad (2)$$

$$UOC = (-i/2h) \quad (3)$$

onde  $Ds_{max}$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ) é a densidade máxima obtida durante os ensaios e  $UOC$  ( $\text{g g}^{-1}$ ) é a umidade ótima de compactação. Assim, a  $Ds_{max}$  obtida foi de  $1,54 \text{ g cm}^{-3}$  e a  $UOC$  foi de  $0,24 \text{ g g}^{-1}$  (Figura 2).



**Figura 2** - Densidade máxima ( $Ds_{max}$ ) e umidade ótima de compactação ( $UOC$ ) (C) de um Cambissolos Háplico Distrófico.

Desse modo, o  $GC$  (%) neste trabalho foi considerado como sendo a razão entre a  $Ds$  observada e a  $Ds_{max}$  ( $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ ) obtida nos ensaios de Proctor Normal (Equação 4):

$$GC = (Ds/Ds_{max}) * 100 \quad (4)$$

#### 5.4 Calibração

Para o ajuste dos modelos de intervalo hídrico ótimo ( $IHO$ ), curva de retenção de água no solo ( $CRA$ ) e curva de resistência do solo à penetração ( $CRP$ ) foram coletadas amostras com estrutura preservada. As amostras foram coletadas na camada de 10 a 20 cm de profundidade, sendo seis amostras em cada um dos três tratamentos do experimento e seis amostras na

entrelinha, totalizando 24 amostras. Para tal, foram utilizados cilindros de plástico rígido com cerca de 10 cm de diâmetro interno e 5 cm de altura.

Após coleta em campo, as amostras foram devidamente acondicionadas para transporte e posterior análise. Em laboratório, com o intuito de garantir que a massa de material de solo estivesse contida apenas no interior dos cilindros, o excedente de material de terra foi removido. Após o preparo as amostras foram submetidas a saturação lenta por capilaridade com água destilada.

#### 5.4.1 Retenção de Água no Solo

Depois de saturadas, as amostras foram pesadas e então submetidas às tensões de: -2, -4, -6 e -10 kPa utilizando as unidades de sucção em funis de Buchner; e -33, -100, -500 e -1500 kPa em extratores de Richards (TEIXAIRA; BEHRING, 2017). Após o equilíbrio em cada tensão as amostras foram pesadas para posterior cálculo da umidade. O modelo de van Genuchten (1980) com restrição de Mualen ( $m = 1 - 1/n$ ) foi ajustado aos dados de umidade obtidos nas amostras em cada potencial (Equação 5). Os parâmetros obtidos nos ajustes do modelo de van Genuchten foram utilizados para o cálculo do índice S (Equação 6):

$$U = \frac{(U_s - U_r)}{1 + [(\alpha \Psi)^n]^m} \quad (5)$$

$$S = -n(U_{sat} - U_r)(1 + 1/m)^{-(1+m)} \quad (6)$$

onde que  $U$  é a umidade ( $\text{g g}^{-1}$ ) no potencial matricial  $\Psi$  (kPa) correspondente;  $U_s$  e  $U_r$  são respectivamente a umidade ( $\text{g g}^{-1}$ ) na saturação e umidade residual ( $\Psi = -1500$  kPa);  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros do modelo; e  $S$  é inclinação da *CRA* no ponto de inflexão (DEXTER, 2004b).

A porosidade das amostras foi dividida em quatro classes de diâmetro: macroporos ( $> 50 \mu\text{m}$ ); mesoporos ( $50 - 3 \mu\text{m}$ ); microporos ( $3 - 0,2 \mu\text{m}$ ); e criptoporos ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ). O diâmetro dos poros das amostras foi calculado conforme equação 7:

$$d = \frac{4\sigma \cos\beta}{\Psi} \quad (7)$$

em que  $d$  é diâmetro do poro ( $\mu\text{m}$ );  $\sigma$  é tensão superficial da água (73,43 kPa mm a 20 °C);  $\beta$  é ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como 0); e  $\Psi$  é tensão de água no solo (kPa). O volume total de poros foi considerado como a umidade volumétrica na saturação. O volume de poros em cada classe foi obtido pela diferença entre a umidade volumétrica na tensão correspondente ao seu maior diâmetro e o conteúdo de água na tensão equivalente ao maior diâmetro da classe inferior.

### 5.4.2 Intervalo Hídrico Ótimo

Após o equilíbrio em cada potencial para construção das CRAs as amostras foram novamente saturadas por capilaridade para então realizar o monitoramento do decaimento da umidade por secagem ao ar. No decorrer do processo de secagem foram realizados 6 testes de  $RP$  em cada amostra com umidades decrescentes, com a utilização de um penetrógrafo de bancada da marca Marconi, modelo MA 933. O procedimento para cálculo da  $RP$  foi feito conforme descrito por Tormena et al. (1998). A sonda de penetração utilizada nas leituras de  $RP$  possui ponteira de cone circular reto com  $45^\circ$  e 3.66 mm de diâmetro. Assim, as leituras de  $RP$  foram consideradas como a razão da força exercida pelo equipamento e a área do cone (Equação 8):

$$RP = \frac{Fg}{\pi r^2 / \cos(45^\circ)} \frac{1}{10^6} \therefore RP = F 0.65910 \quad (8)$$

em que  $RP$  é a resistência do solo à penetração do cone (MPa);  $F$  é a resistência registrada pelo equipamento (Kgf);  $g$  é a aceleração da gravidade em ( $m s^{-2}$ ); e  $r$  é o raio da ponteira (m).

Após a última leitura de  $RP$  as amostras foram levadas para secagem em estufa  $105 - 110^\circ C$  por 48h para determinação da massa seca. Foi ajustado o modelo de Busscher (1990) (Equação 9) para descrever o comportamento de resistência à penetração em função da umidade e da densidade do solo:

$$RP = a \theta^b Ds^c \quad (9)$$

onde a  $RP$  é a resistência do solo à penetração (MPa);  $Ds$  é a densidade do solo ( $g cm^{-3}$ );  $\theta$  é a umidade do solo ( $cm^3 cm^{-3}$ );  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros de ajuste do modelo.

O  $IHO$  foi determinado conforme descrito por Tormena et al. (1998). Os limites de  $\theta$  ( $cm^3 cm^{-3}$ ) do  $IHO$  em que há restrições ao crescimento do cafeeiro foram adotados como sendo a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ), que foram obtidas nos potenciais de -10 e -1500 kPa respectivamente (Equação 10), a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) que foi considerada como  $0,10 cm^3 cm^{-3}$  (Equação 11) e a umidade em que se atinge uma  $RP$  crítica ao desenvolvimento de raízes ( $\theta_{RP}$ ), que foi calculada tendo como base o valor limitante de 3,0 MPa ( $RP_L$ ), por se tratar de uma cultura perene e arbustiva (SERAFIM et al., 2013c; SILVA et al., 2015a, 2019) (Equação 12):

$$\theta = d\Psi^e Ds^f \quad (10)$$

$$\theta = (1 - Ds/Dp) - 0.1 \quad (11)$$

$$\theta = [3/(aDs^c)]^{(1/b)} \quad (12)$$

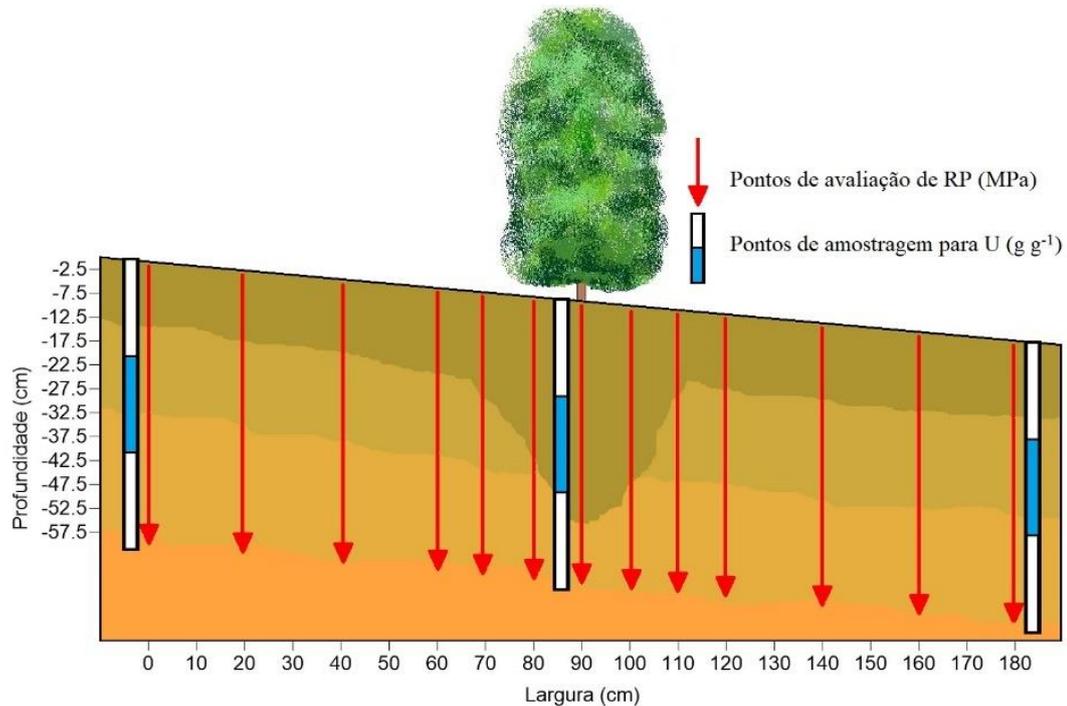
em que  $\Psi$  é tensão de água no solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (kPa);  $D_s$  é densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $D_p$  é a densidade de partículas da área experimental ( $2.33 \text{ g cm}^{-3}$ );  $a, b, c, d, e$  e  $f$  são parâmetros de ajuste dos modelos.

O *IHO* foi considerado como a diferença entre os limites superiores e limites inferiores, conforme as limitações físicas do solo estudado (GUIMARÃES et al., 2013). O limite superior foi considerado para cada  $D_s$  como sendo o menor valor de  $\theta$  entre  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{PA}$ , e o limite inferior como sendo o maior valor de  $\theta$  entre  $\theta_{pmp}$  e  $\theta_{RP}$ .

### 5.5 Penetrometria em Campo

Em campo, para construir as imagens de distribuição espacial da *RP* do perfil do sulco de plantio foram realizados ensaios de penetrometria em transectos dispostos de forma perpendicular à linha de plantio, sendo três transectos para cada tratamento anteriormente descrito. A análise de *RP* foi realizada com a utilização de um penetrômetro de impacto (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983) de ponta fina dotada de ângulo de  $30^\circ$  (STOLF, 1991).

Em cada transecto foram tomados 13 pontos de aferição da *RP* até 60 cm de profundidade (Figura 3). Dois espaçamentos entre os pontos de aferição foram adotados: dentro da área do sulco de plantio (largura de 50 cm) o espaçamento foi de 10 cm; nas áreas adjacentes ao sulco o espaçamento foi de 20 cm. Ao final, o comprimento do transecto foi de 180 cm, centralizado com a linha de plantio.



**Figura 3** - Representação da disposição dos pontos leitura de *RP* e dos pontos de coleta de amostras de terra para determinação de umidade.

Na mesma ocasião, com a utilização de um trado de rosca, foram tomadas amostras de terra para determinação da umidade gravimétrica  $U$  ( $\text{g g}^{-1}$ ) em três pontos ao longo do transecto nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm (Figura 3). Um ponto no centro coincidindo com a planta na linha de plantio, e outros dois pontos, um em cada entrelinha, à 90 cm de distância do ponto central.

### 5.6 Predição da Densidade do Solo ( $D_{sp}$ ) nos Perfis dos Sulcos de Plantio

Para gerar perfis de *IHO* e *GC* do perfil dos sulcos de plantio é necessário que tenhamos dados sobre a densidade do solo. Entretanto, coletar amostras indeformadas do perfil do solo se torna extremamente laborioso e demorado. Uma alternativa é estimar a  $D_s$  a partir de dados de *RP*. Desse modo, os mesmos dados coletados para gerar os modelos de *CRA* e *IHO* foram utilizados para ajustar uma segunda curva de resistência do solo à penetração ( $CRP_u$ ). No entanto, no ajuste desta, utilizou-se umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ) no lugar de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) no modelo proposto por Busscher (1990) (Equação 13):

$$RP = o U^p D_s^q \quad (13)$$

em que *RP* é a resistência a penetração determinada em laboratório (MPa); *U* é a umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ); *o*, *p* e *q* são parâmetros de ajuste do modelo.

Tal alteração foi realizada para que o modelo possa ser aplicado para estimar a  $D$  e  $GC$  (Equações 14 e 15) dos perfis dos sulcos de plantio a partir dos dados de  $RP$  e  $U$  obtidos no momento das avaliações em campo:

$$Dsp = [RPc/(o U^p)]^{(1/q)} \quad (14)$$

$$GCp = (Dsp/Dsmax) * 100 \quad (15)$$

onde  $Dsp$  ( $g\ cm^{-3}$ ) é a densidade do solo predita;  $RPc$  (MPa) é resistência do solo à penetração determinada em campo;  $U$  ( $g\ g^{-1}$ ) é umidade de campo obtida pela malha de valores interpolados (triangulação linear), nas coordenadas coincidentes de cada valor de  $RPc$ ;  $GCp$  (%) é o grau de compactação predito;  $o$ ,  $p$  e  $q$  são parâmetros obtidos pela equação 13.

O  $IHO$  dos perfis dos sulcos de plantio foi calculado utilizando os valores de  $Dsp$  espacializada. Assim, os limites superiores e inferiores do  $IHO$  espacializado foi calculado como sendo: a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ), quando os valores de  $Dsp$  não eram restritivos (Equação 16); e quando a  $Dsp$  aumentava para valores onde haviam restrições físicas, esses limites eram determinados pela porosidade mínima de aeração e pela impedância mecânica, conforme critérios estabelecidos anteriormente na sessão 5.4.2 (Equações 17 e 18);

$$\theta = d\Psi^e Dsp^f \quad (16)$$

$$\theta = (1 - Dsp/Dp) - 0.1 \quad (17)$$

$$\theta = [3/(aDsp^c)]^{(1/b)} \quad (18)$$

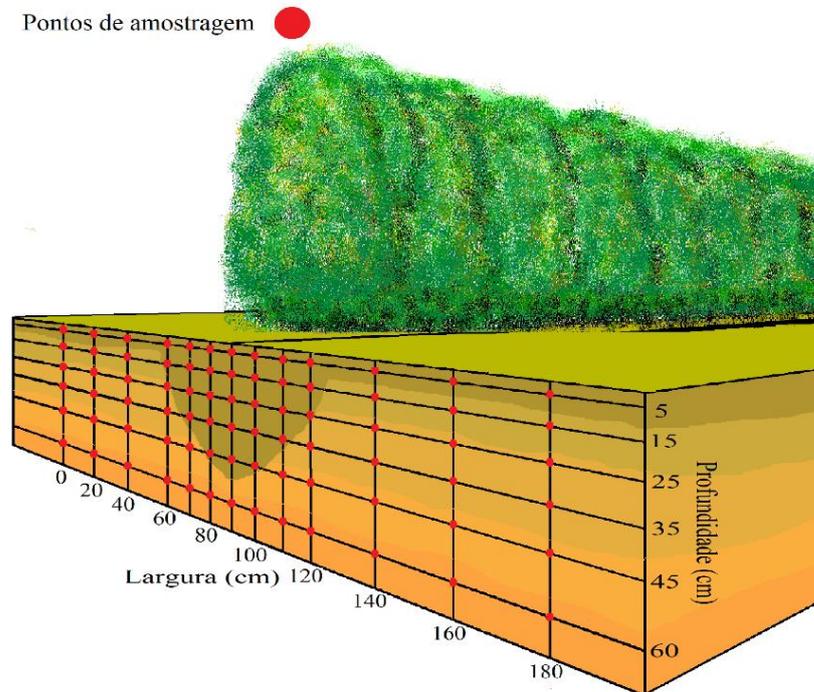
onde os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  foram obtidos pela equação 9 e os parâmetros  $d$ ,  $e$  e  $f$  foram obtidos pela equação 10.

### 5.7 Validação em Campo da $Dsp$ por Meio da Amostragem em Trincheiras

Para fazer uma validação da  $Dsp$  foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros com cerca de 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura. A amostragem foi realizada após as avaliações de  $RPc$  em dois locais escolhidos ao acaso, nos tratamentos T40b e T60a. Não foram coletadas amostras no tratamento T80, devido às limitações do penetrômetro utilizado em campo, cuja profundidade máxima de avaliação é de 60 cm.

Duas trincheiras foram abertas no sentido perpendicular à linha de plantio, a cerca de 20 cm dos transectos de avaliação de  $RPc$ . Com a utilização de um amostrador tipo Uhland, 78 amostras foram coletadas em cada trincheira. Foram estudadas seis camadas com profundidades de coleta de 5, 15, 25, 35, 45 e 60 cm, sendo 13 amostras para cada camada avaliada, cobrindo uma extensão de 180 cm (Figura 4). Dois espaçamentos horizontais entre as amostras foram

adotados: dentro da área do sulco de plantio, cobrindo uma largura de 60 cm, o espaçamento foi de 10 cm; e nas áreas adjacentes ao sulco o espaçamento foi de 20 cm.

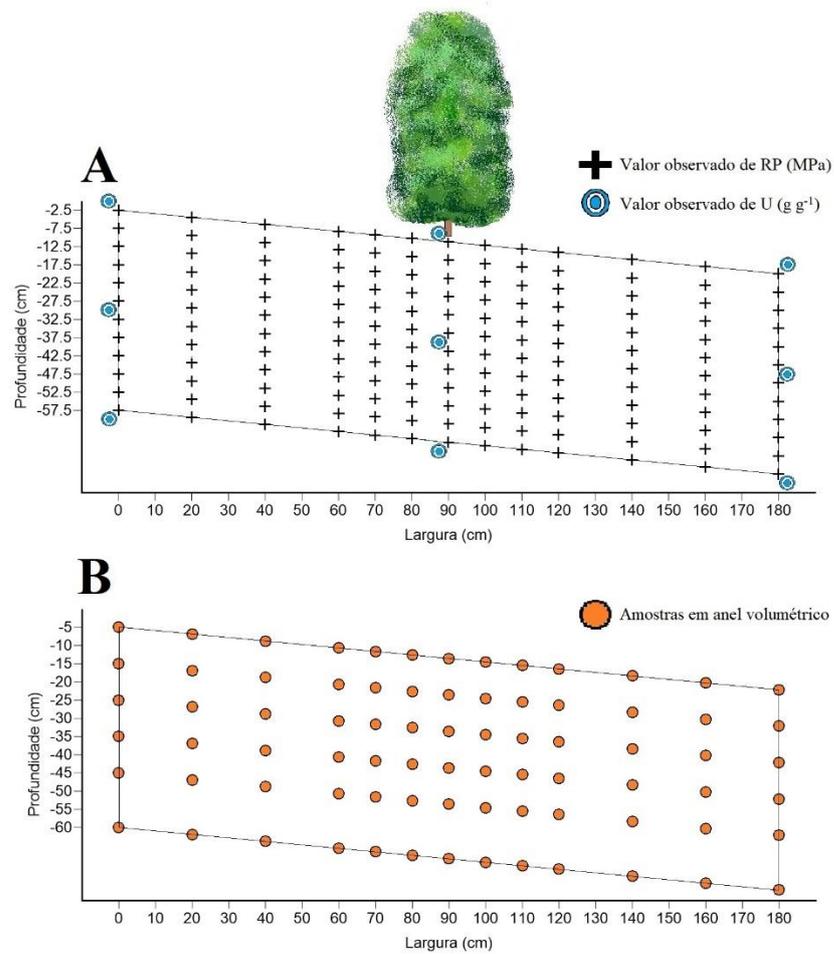


**Figura 4** - Representação do grid de amostragem de material com estrutura preservada no perfil do sulco de plantio.

Em laboratório, as amostras foram preparadas afim de remover o excedente de material e posteriormente foram secadas em estufa (105°C). A densidade das amostras foi calculada pela razão entre a massa de sólidos e o volume total do solo estimado pelo volume dos cilindros de coletada em campo (ALMEIDA et al., 2017).

## 5.8 Recursos Computacionais e Análises de Dados

Para gerar as imagens da distribuição espacial dos diferentes atributos no perfil solo, foi necessário determinar no espaço a localização de cada ponto amostral. Para tal, foram criados grids amostrais, considerando determinados espaçamentos horizontais e verticais entre cada observação. Para a penetrometria realizada em campo, o espaçamento horizontal das observações de *RP* no grid foi considerado conforme descrito anteriormente (Figura 3). Enquanto que o espaçamento vertical das observações de *RP* foi adotado segundo procedimento de cálculo utilizando o software Microsoft Excel (STOLF et al., 2014), com valores calculados a cada 5 cm de profundidade (Figura 5A).



**Figura 5** - Disposição espacial dos valores de *RP*, *U* (A) e amostras coletadas em cilindros nas trincheiras (B) em relação às plantas na linha de plantio.

O grid para *U* foi construído conforme procedimento de amostragem em campo (Figura 5A). A partir dos pontos amostrados foram criadas malhas com valores interpolados (triangulação linear) de *U*, com dimensões análogas ao estabelecido para *RP*. De forma semelhante ao feito para *U*, os dados obtidos pela análise das amostras coletadas em cilindros dentro das trincheiras foram organizados no espaço conforme procedimento de coleta (Figura 5B). A fim de evitar distorções nas imagens geradas, a declividade do terreno (*D*) foi considerada para cada transecto na lavoura, sendo determinada por meio de mangueira de nível.

A dependência espacial das variáveis analisadas neste trabalho foi avaliada por meio da construção de semivariogramas (APÊNDICES B, C, D e E) utilizando pacote “geoR” (DIGGLE; RIBEIRO, 2007) no software R (R CORE TEAM, 2020).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum x_i x_j [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (19)$$

em que  $|x_i - x_j| = h$ ,  $Z(x_i)$  e  $Z(x_j)$  são valores da variável  $Z$  nos pontos  $i$  e  $j$  respectivamente,  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações. O modelo esférico foi escolhido por melhor se ajustar aos dados (Equação 20):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad (20)$$

onde  $C_0$  é o valor da semivariância para distância zero (afeito pepita),  $C_1$  é a contribuição,  $a$  é o alcance dentro do qual às observações apresentam-se correlacionadas espacialmente. O procedimento matemático para cálculo de pontos não amostrado no perfil foi feito utilização Krigagem ordinária, e as imagens dos perfis foram geradas utilizando o software Surfer, versão 13.6.618 (GOLDEN SOFTWARE, 2016).

Os procedimentos para ajustes dos modelos utilizados nesse trabalho foram feitos utilizando função do pacote “nlstools” (BATY et al., 2015) no software R. Para verificar o ajuste dos modelos foram utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz quadrada do erro médio (RMSE) entre os valores observados de umidade e os calculados.

Na *CRA*, após ajuste do modelo, o intervalo de confiança foi definido pelo método não paramétrico de reamostragem de bootstrap (EFRON; TIBSHIRANI, 1986). Para o volume total de poros, macroporos, mesoporos, microporos, criptoporos e faixas de valores de *IHO* foram realizados testes de média (Tukey) utilizando-se do teste  $t$  e adotando-se 1 e 5% de probabilidade.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Retenção de Água no Solo

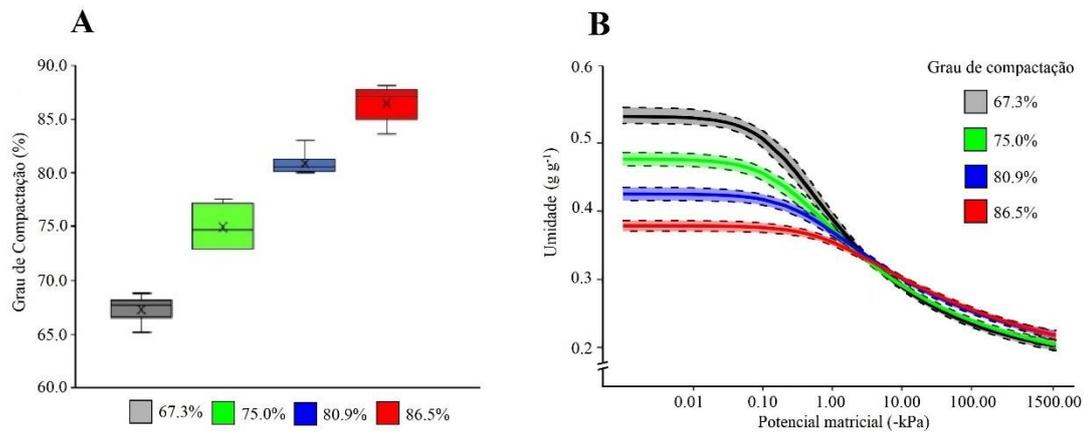
As amostras coletadas para calibração apresentaram  $D_s$  variando de 1,00 até 1,36 g cm<sup>-3</sup>, e estas foram divididas em quatro grupos de *GC*: 67,3; 75,0; 80,9; e 86,5% (Figura 6A). Para cada um dos grupos de *GC* foi ajustado uma *CRA*, e os parâmetros da equação de van Genuchten, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice  $S$  estão apresentados na tabela 1.

**Tabela 1** - Estimativas dos parâmetros da equação van Genuchten ajustada para amostras de um Cambissolo Háplico Distrófico com diferentes graus de compactação.

| GC%  | Parâmetros | IC (95%)* | RMSE            | R <sup>2</sup> | Uj** | S    | N***  |   |
|------|------------|-----------|-----------------|----------------|------|------|-------|---|
| 67.3 | <i>Us</i>  | 0.54      | [0.53; 0.55]    | 0.0149         | 0.97 | 0.43 | 0.058 | 7 |
|      | <i>Ur</i>  | 0.18      | [0.15; 0.19]    |                |      |      |       |   |
|      | <i>α</i>   | 6.211     | [3.968; 11.270] |                |      |      |       |   |
|      | <i>n</i>   | 1.285     | [1.218; 1.356]  |                |      |      |       |   |
| 75.0 | <i>Us</i>  | 0.48      | [0.47; 0.49]    | 0.0107         | 0.97 | 0.39 | 0.044 | 5 |
|      | <i>Ur</i>  | 0.16      | [0.13; 0.19]    |                |      |      |       |   |
|      | <i>α</i>   | 5.297     | [3.308; 9.855]  |                |      |      |       |   |
|      | <i>n</i>   | 1.230     | [1.167; 1.296]  |                |      |      |       |   |
| 80.9 | <i>Us</i>  | 0.43      | [0.42; 0.44]    | 0.0117         | 0.95 | 0.36 | 0.032 | 6 |
|      | <i>Ur</i>  | 0.17      | [0.11; 0.20]    |                |      |      |       |   |
|      | <i>α</i>   | 2.792     | [1.642; 5.518]  |                |      |      |       |   |
|      | <i>n</i>   | 1.201     | [1.128; 1.281]  |                |      |      |       |   |
| 86.5 | <i>Us</i>  | 0.38      | [0.37; 0.39]    | 0.0101         | 0.96 | 0.32 | 0.025 | 6 |
|      | <i>Ur</i>  | 0.15      | [0.04; 0.19]    |                |      |      |       |   |
|      | <i>α</i>   | 1.186     | [0.662; 2.401]  |                |      |      |       |   |
|      | <i>n</i>   | 1.167     | [1.085; 1.261]  |                |      |      |       |   |

\*Intervalo de confiança dos parâmetros \*\*umidade (g g<sup>-1</sup>) \*\*\*número de amostras utilizadas na modelagem.

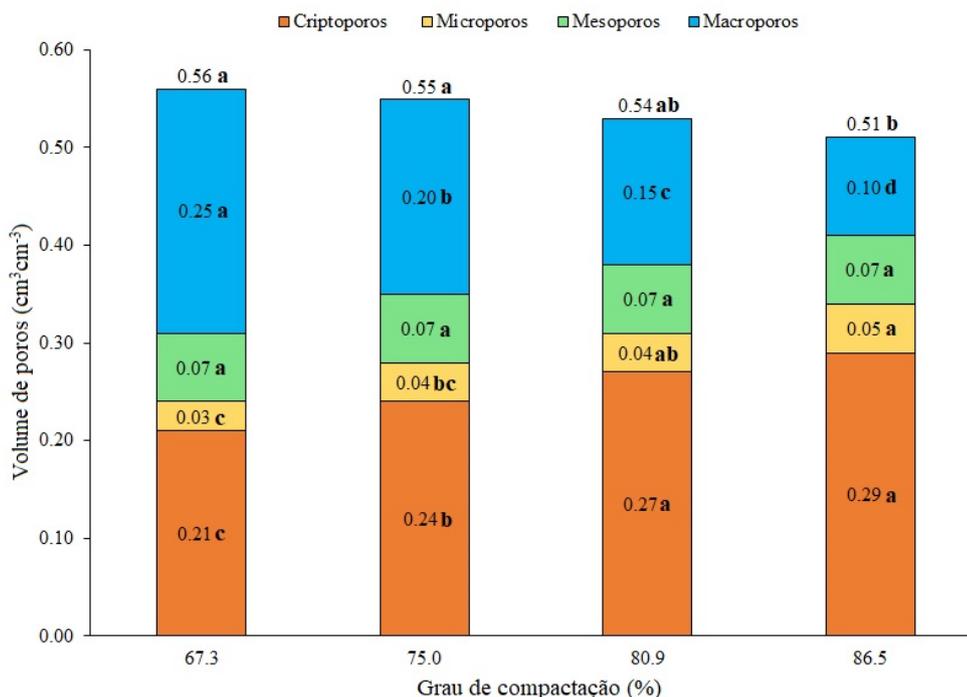
Os modelos ajustados para *CRA* foram significativos pelo teste de F ( $p < 0,001$ ), apresentando alto poder explicativo, com R<sup>2</sup> superior a 95%. Em condições de menor energia de retenção ( $> -1,00$  kPa) as *CRAs* diferem mais umas das outras em função do *GC*, sendo consequência de diferenças na porosidade total (Figura 6B). Por outro lado, a partir de  $-6,00$  kPa, as amostras dos *GC* de 67,3 e 75,5% não diferem entre si, assim como os *GC* de 80,9 e 86,5% também não apresentam diferenças significativas quando considerando intervalo de confiança de 95%.



**Figura 6** - Graus de compactação e curvas de retenção de água em um Cambissolo Háplico Distrófico de textura franco argilosa. Área colorida nas curvas de retenção (B) representa intervalo de confiança de bootstrap (95%).

Partindo da saturação, a perda de umidade do solo ocorre inicialmente pela drenagem da água retida nos poros de maior diâmetro, seguido pelo esvaziamento gradativo de poros de dimensões cada vez menores até secagem total. De tal forma, em baixos potenciais matriciais, a retenção de água no solo é governada por fenômenos de capilaridade (RAWLS; GISH; BRAKENSIEK, 1991), ao passo que em potenciais mais elevados, a retenção é governada pela capacidade de adsorção de moléculas de água na superfície das partículas do solo (CARDUCCI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2004).

Com o aumento do *GC* observou-se redução no volume de água retido sob menores energias de retenção, comportamento este, que tende a se inverter ao passo em que aumenta a tensão de água no solo (Figura 6B). Tal fato decorre da diferença na porosidade total, e da distribuição de poros por tamanho nas amostras avaliadas (Figura 7).



**Figura 7** - Porosidade total e classes de poros de um Cambissolo Háplico Distrófico em função do grau de compactação (*GC*). Letras minúsculas comparam uma mesma classe de poros para diferentes *GC*, onde médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5%).

Como observado, a porosidade total variou de 0,51 até 0,56  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  entre o menor e no maior *GC* respectivamente. O volume de macroporos foi o que apresentou maior variação, com redução de volume desses poros em resposta ao aumento do *GC*, sendo observada diferença estatística significativa entre todos os grupos de *GC*. Já o volume de criptoporos aumentou em função do aumento do *GC*, variando de 0,21 até 0,29  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Entretanto, não foi observada diferença estatística significativa entre os *GC* de 80,9 e 86,5%. Quanto aos microporos, estes quase não sofreram alteração, embora tenha sido observada tendência ao aumento em função do incremento do *GC*. Não foram observadas diferenças significativas no volume de mesoporos.

De forma simplificada, a porosidade do solo pode ser dividida em porosidade textural e porosidade estrutural, ou porosidade intra e inter-agregados (GUÉRIF et al., 2001). A porosidade textural depende, primordialmente, da proporção e distribuição das frações granulométricas (> 2mm) que compõem a matriz do solo, bem como sua própria mineralogia. Já a porosidade estrutural, compreendida por poros de maior diâmetro, é função da organização espacial das partículas constituintes do solo, sendo determinada pela presença dos agregados e seus espaços vazios associados (CARDUCCI et al., 2013). A porosidade textural é pouco

afetada pelo manejo do solo, por outro lado, a porosidade estrutural é sensível às práticas mecânicas pertinentes ao cultivo e a atividade de organismos no solo (DEXTER, 2004b).

O ponto de inflexão das CRAs ocorreu sob baixos potenciais (entre -0,5 e -4,0 kPa), com  $U_i$  variando de 0,32 até 0,43 g g<sup>-1</sup> (Tabela 1). Esse resultado é reflexo de uma distribuição bimodal de poros nas amostras analisadas, principalmente nos menores GC, e a inclinação da CRA neste ponto de inflexão pode ser entendida como inclinação estrutural (CARDUCCI et al., 2011). Esta inclinação é tida como parâmetro de avaliação da qualidade física do solo, representada pelo índice  $S$  (DEXTER, 2004b).

O índice  $S$  das curvas ajustadas para cada GC variou de 0,025 até 0,058. Segundo Andrade & Stone (2009), que utilizaram o índice  $S$  em solos do cerrado brasileiro, o valor de  $S$  igual a 0,045 pode ser considerado como limiar para separar solos com boa qualidade estrutural daqueles com tendência a se tornarem degradados. Assim, verificou-se que as amostras com os menores GC (principalmente 67,3%) são consideradas como de boa qualidade estrutural. Já as amostras pertencentes aos GC de 75,0 e 80,9%, por outro lado, apresentam indícios de degradação física ( $S < 0,045$ ). O maior GC (86,5%) apresentou  $S = 0,025$ , valor abaixo do qual se considera forte degradação física do solo (ANDRADE; STONE, 2009).

## 6.2 Intervalo Hídrico Ótimo

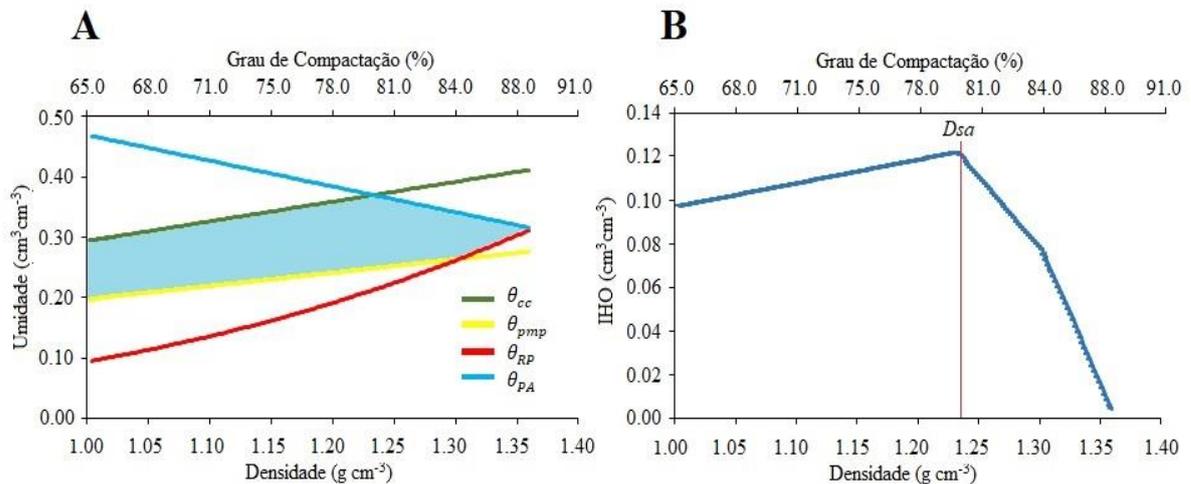
Os modelos utilizados para o ajuste da resistência do solo à penetração e retenção de água do IHO foram significativos pelo teste de F ( $p < 0,01$ ) (Tabela 2). Considerando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o modelo ajustado pode explicar cerca de 87% da variação da  $RP$  em função da  $D_s$  e de  $\theta$ . Quanto à  $\theta$ , essa variou positivamente em relação ao aumento da  $D_s$  e negativamente quanto à  $\Psi$ , e o modelo pode explicar cerca de 94% de sua variabilidade.

**Tabela 2** - Estimativas dos parâmetros de ajuste das equações utilizadas para determinação do Intervalo Hídrico Ótimo em Cambissolo Háplico Distrófico.

| Equação                   | Parâmetros | IC (95%)* | RMSE             | R <sup>2</sup> | N**  |    |
|---------------------------|------------|-----------|------------------|----------------|------|----|
| $RP = a \theta^b D_s^c$   | $a$        | 0.008     | [0.005; 0.013]   | 0.336          | 0.87 | 24 |
|                           | $b$        | -2.514    | [-2.776; -2.268] |                |      |    |
|                           | $c$        | 9.878     | [8.877; 10.960]  |                |      |    |
| $\theta = d \Psi^e D_s^f$ | $d$        | 0.354     | [0.348; 0.359]   | 0.017          | 0.94 | 24 |
|                           | $e$        | -0.080    | [-0.083; -0.076] |                |      |    |
|                           | $f$        | 1.099     | [1.037; 1.161]   |                |      |    |

\*Intervalo de confiança dos parâmetros \*\*número de amostras utilizadas na modelagem.

O *IHO* aumentou em função do aumento do *GC* até 80%, variando de cerca de 0,10 até 0,12  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ . A partir do *GC* de 80% foi observado diminuição do *IHO* até valores próximos de zero (Figura 8B).



**Figura 8** - Intervalo hídrico ótimo em um Cambissolo Háplico Distrófico de textura franco argilosa manejado sob lavoura cafeeira no Município de Nazareno – MG.

A influência do *GC* sobre a capacidade de retenção foi mais pronunciada no potencial equivalente à capacidade de campo ( $\Psi_{cc} = -10$  kPa) do que no ponto de murcha permanente ( $\Psi_{pmp} = -1500$  kPa) (Figura do 8A). Tal resultado se deve a alterações na porosidade total e distribuição de poros por tamanho (DEXTER et al., 2008; KLEIN; LIBARDI, 2002; RICHARD et al., 2001). O aumento do *GC* implica em maior massa de partículas, e conseqüentemente maior superfície de adsorção de água por unidade de volume de solo, resultando em maior retenção de água (GUIMARÃES et al., 2013).

Foi verificado aumento do *IHO* em decorrência do aumento do *GC* até cerca de 80%, onde os limites superiores e inferiores foram determinados pela  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{pmp}$  respectivamente. A partir de então observaram-se dois intervalos de *GC* caracterizados pela diminuição do *IHO* em duas diferentes intensidades (Figura do 8B). Estudos anteriores indicaram que o aumento do *GC* pode, até certo ponto, ser benéfico ao crescimento vegetal devido ao aumento da retenção de água (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; DA SILVA, 2013; SEVERIANO et al., 2011).

A capacidade de aeração foi progressivamente reduzida com o aumento *GC* (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998), sendo resultante da diminuição do volume de poros de maior diâmetro como demonstrado anteriormente pela Figura 7. Dessa forma, o primeiro fator a se tornar limitante foi a  $\theta_{PA}$ , onde o *GC* de 80 % corresponde a  $D_s$  de 1,23  $\text{g cm}^{-3}$ , podendo

este valor ser considerado como densidade de alerta ( $D_{sa}$ ), conforme discutido por Guimarães et al. (2013). A partir de cerca de 85 %, o acréscimo no  $GC$  resulta em uma diminuição mais acentuada do  $IHO$ . Nesse  $GC$  a  $D_s$  correspondente é de cerca de  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ , densidade essa, onde  $\theta_{RP}$  passa a ser o limite inferior do  $IHO$  considerando uma  $RP_L$  de  $3,0 \text{ MPa}$  (SERAFIM et al., 2013c; SILVA et al., 2015a, 2019).

As amostras utilizadas para construção dos modelos apresentaram  $D_s$  variando de  $1,00$  até  $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ . Com tal amplitude foi possível verificar  $IHO$  próximo a zero ( $0,004 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) onde se atinge a densidade crítica ( $D_{sc}$ ). Assim, devido a quase nulidade do  $IHO$ , o valor  $1,36 \text{ g cm}^{-3}$  foi considerado como  $D_{sc}$ , correspondendo ao  $GC$  de 88%. Valores de  $D_s$  superiores à  $D_{sc}$  são considerados extremamente limitantes ao crescimento vegetal, independentemente da umidade presente no solo, seja por limitação de aeração ou por resistência mecânica ao crescimento de raízes (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

### 6.3 Curva de Resistência do Solo à Penetração

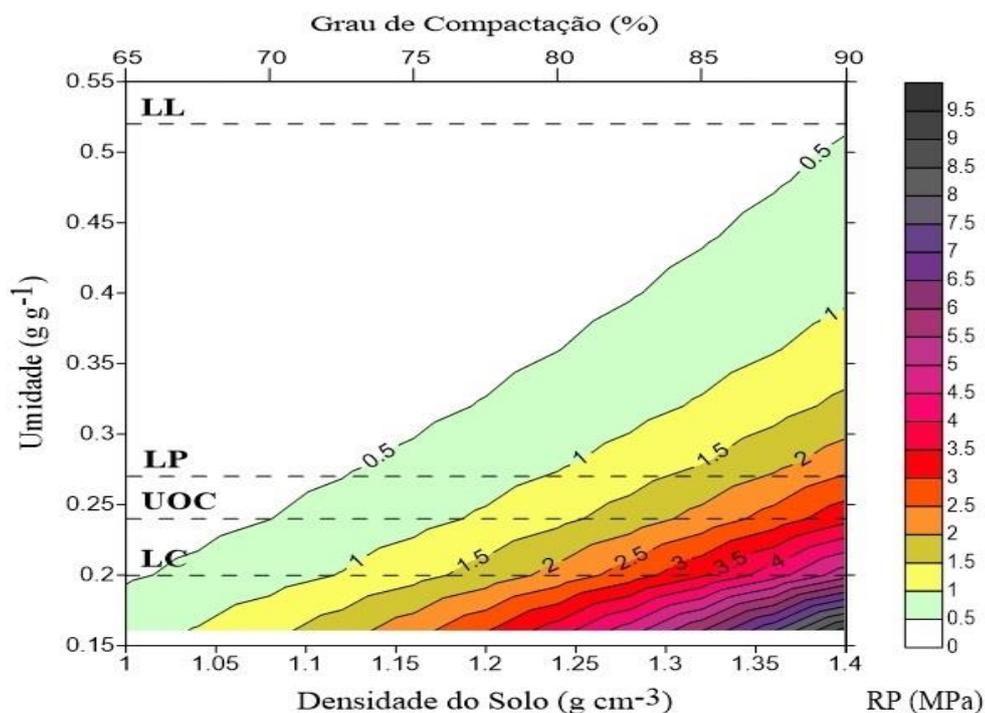
Os parâmetros do modelo ajustado à  $CRPu$  (Equação 13), bem como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) estão apresentados na Tabela 3. O modelo ajustado foi capaz de explicar cerca de 89% da variação da  $RP$  em função da  $D_s$  e de  $U$ . Quanto menor é o valor de  $U$  maior é a influência da  $D_s$  sobre a  $RP$  (BLAINSKI et al., 2009), como pode ser verificado pelo sinal negativo no parâmetro  $p$  e magnitude do parâmetro  $q$ .

**Tabela 3** - Estimativas dos parâmetros de ajuste do modelo aplicado à curva de resistência à penetração de um Cambissolo Háplico Distrófico.

| Equação            | Parâmetros | IC (95%)* | RMSE             | R <sup>2</sup> | N**  |    |
|--------------------|------------|-----------|------------------|----------------|------|----|
| $RP = o U^p D_s^q$ | $o$        | 0.008     | [0.005; 0.013]   | 0.336          | 0.89 | 24 |
|                    | $p$        | -2.514    | [-2.776; -2.268] |                |      |    |
|                    | $q$        | 7.362     | [6.454; 8.346]   |                |      |    |

\*Intervalo de confiança dos parâmetros \*\*número de amostras utilizadas na modelagem.

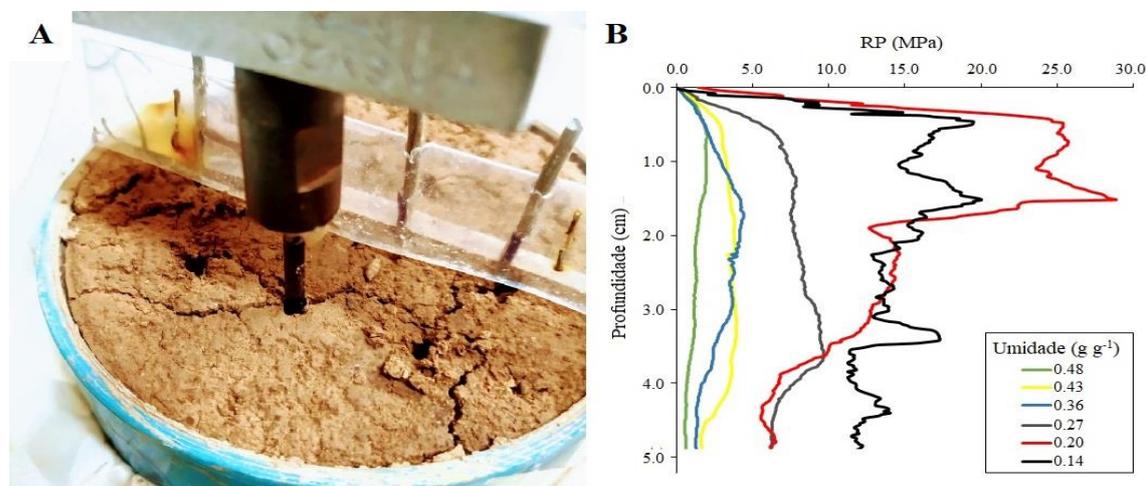
Com o aumento da  $D_s$  e conseqüentemente do  $GC$ , o maior volume relativo de sólidos e o maior ajuste destes, resultam em maior  $RP$  (Figura 9), e esse efeito é intensificado a medida em que ocorre o decréscimo da umidade no solo (DA SILVA; BIANCHINI; DA CUNHA, 2016). Assim, com o aumento das tensões efetivas no solo, tanto uma maior coesão quanto uma maior fricção entre as partículas resultam em maior  $RP$  (ARAUJO; TORMENA; SILVA, 2004; VAZ et al., 2011).



**Figura 9** - Curva de resistência à penetração de um Cambissolo Háplico Distrófico sob lavoura cafeeira localizada no Município de Nazareno, na região dos Campos das Vertentes em Minas Gerais.

Apesar da  $RP$  ser mais sensível a variação da  $D_s$  em umidade mais baixa, não é recomendado realizar os testes de penetrometria, seja em laboratório ou em campo, nessas condições. Quanto mais seco estiver o solo, maior será o desgaste dos equipamentos e conseqüentemente maiores possibilidades de erro nas análises. Quando  $U$  se encontra abaixo da umidade onde se atinge o  $LC$ , o solo é considerado seco e a expressão de sua consistência é

a dureza, que pode ser entendida como a resistência à ruptura de agregados (AITA et al., 2016). Quando os testes de penetrometria são realizados com  $U$  abaixo do  $LC$ , o solo ou amostra de solo tende a rachar em resposta a penetração do cone (Figura 10A).

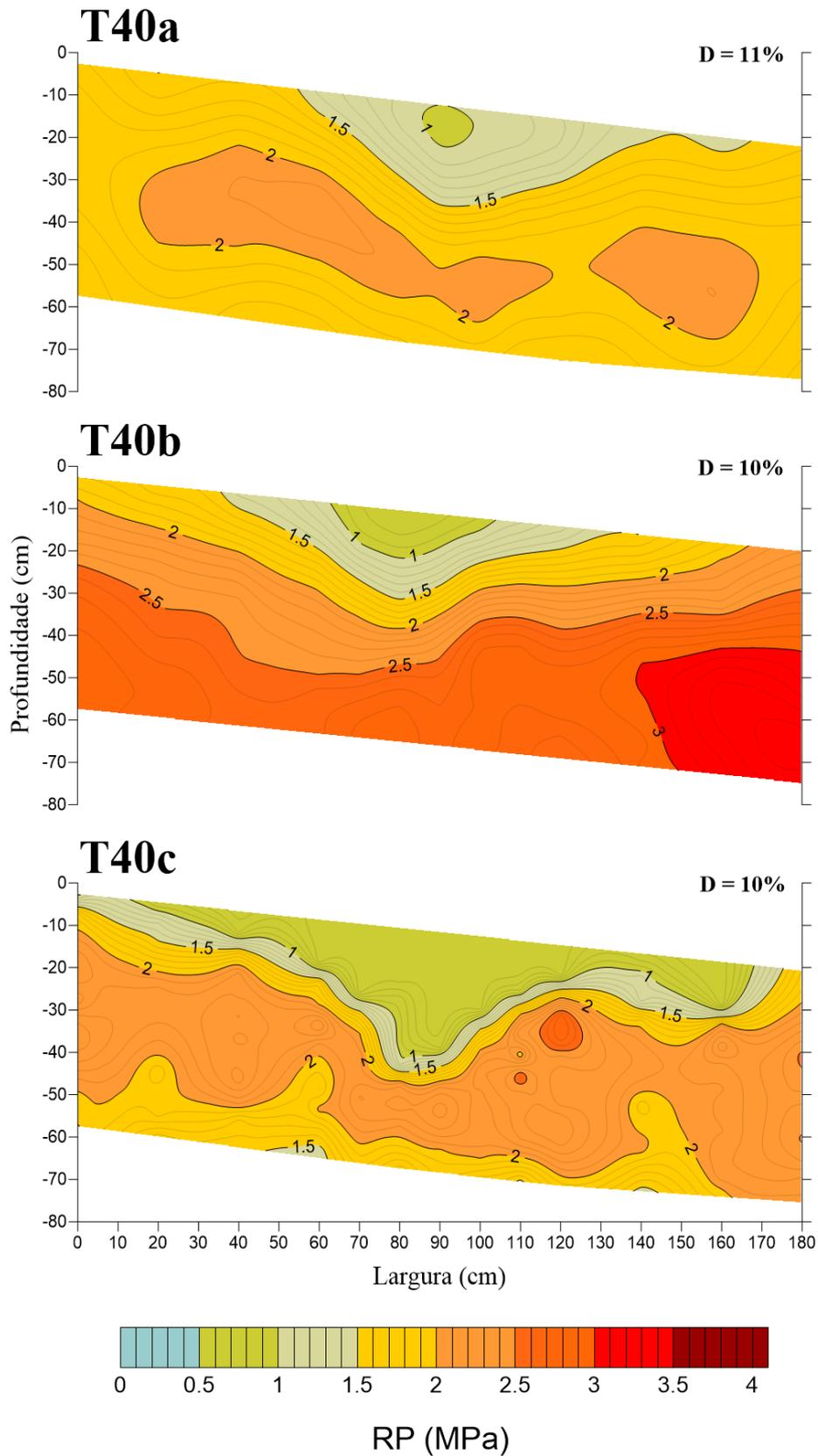


**Figura 10** - Fissura causada pela inserção da haste de penetrógrafo de bancada em amostra de um Cambissolo Háplico Distrófico em condição de umidade abaixo do limite de contração ( $U < 0,20 \text{ g g}^{-1}$ ) (A);  $RP$  em condições decrescentes de umidade em amostra coletada em cilindro de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro (B).

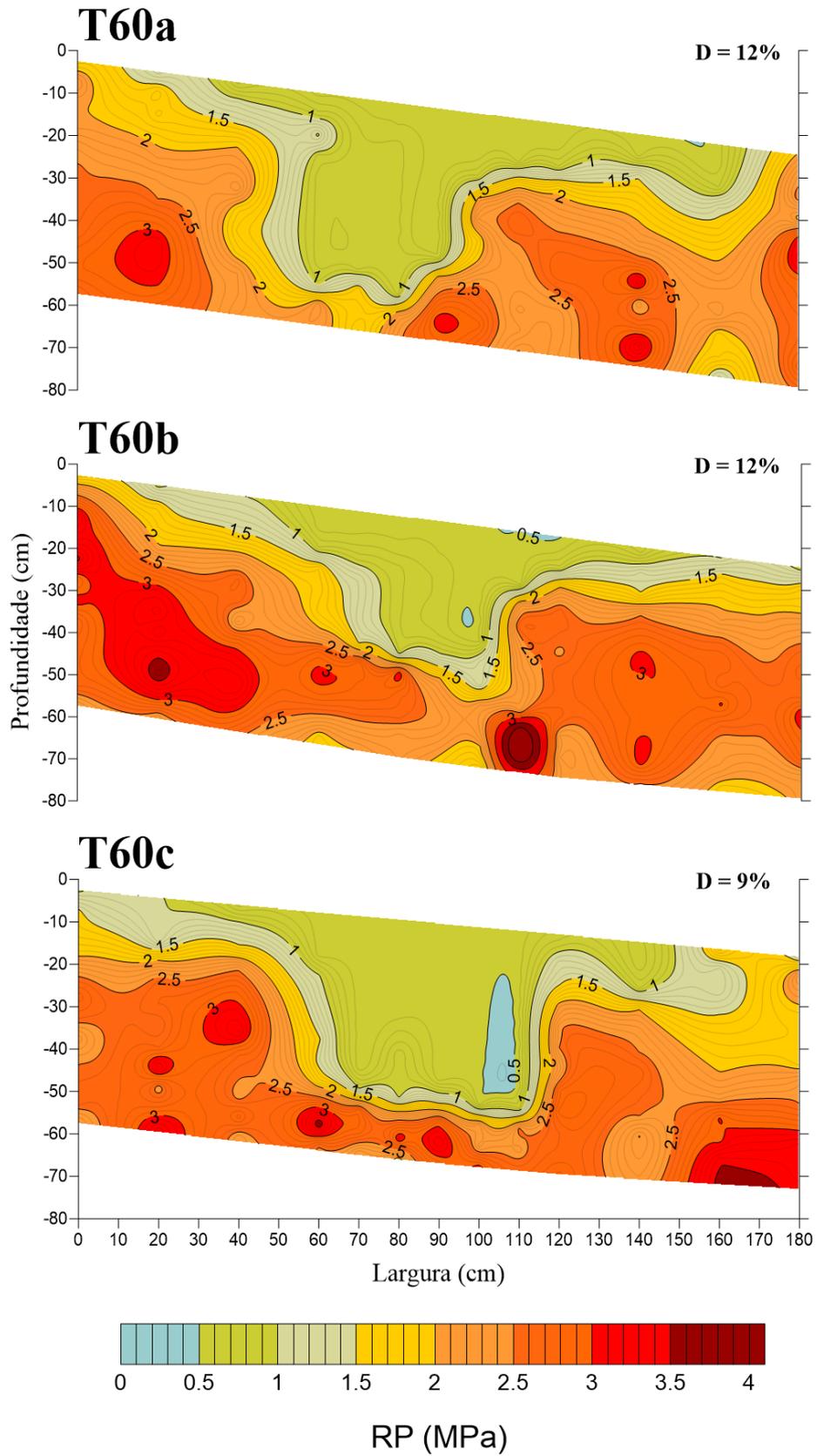
As fissuras já presentes ou aquelas causadas pela penetração do cone podem atuar como caminho preferencial de penetração. Em amostras com estrutura preservada, quando a umidade está próxima ou abaixo  $LC$ , estas fissuras causam erros de leitura, podendo subestimar a  $RP$  (Figura 10B). Por outro lado, em situação de campo as leituras de  $RP$  podem até ser superestimadas, pois estas fissuras conduzem a haste de penetração de forma tortuosa no solo. Nessa situação, o atrito da haste do penetrômetro com a lateral do orifício de inserção no solo será somado à  $RP$  do cone.

#### 6.4 Resistência à Penetração dos Perfis de Sulco de Plantio

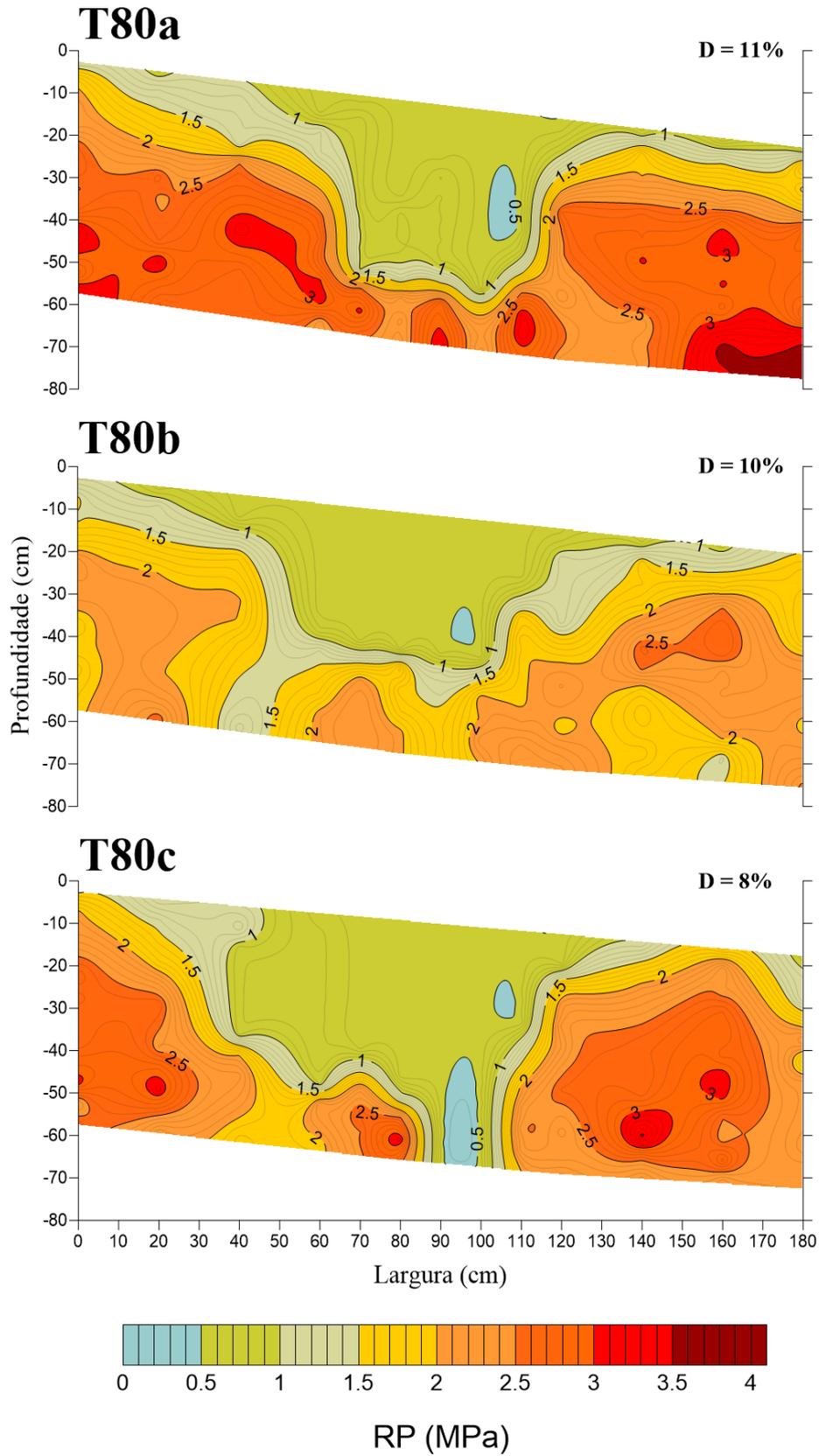
Analisando o efeito do preparo mecânico na redução da  $RP$ , foram verificados formatos característicos de sulco de plantio, diferindo principalmente o T40 dos demais tratamentos (Figuras 11, 12 e 13). É observado que os contornos das isolinhas de  $RP$  no T40 apresentam padrões triangulares na área do sulco, enquanto que no T60 e T80 esses padrões são aproximadamente retangulares. Relata-se que alguns dos perfis analisados apresentaram sulco de plantio ligeiramente deslocados para esquerda. Isso ocorre porque a base do caule das plantas foi utilizada como ponto de referência, sendo tal deslocamento decorrente do posicionamento destas no momento do plantio.



**Figura 11** - Resistência à penetração (*RP*) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + sulcador (40cm).



**Figura 12** - Resistência à penetração (*RP*) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix(60cm).



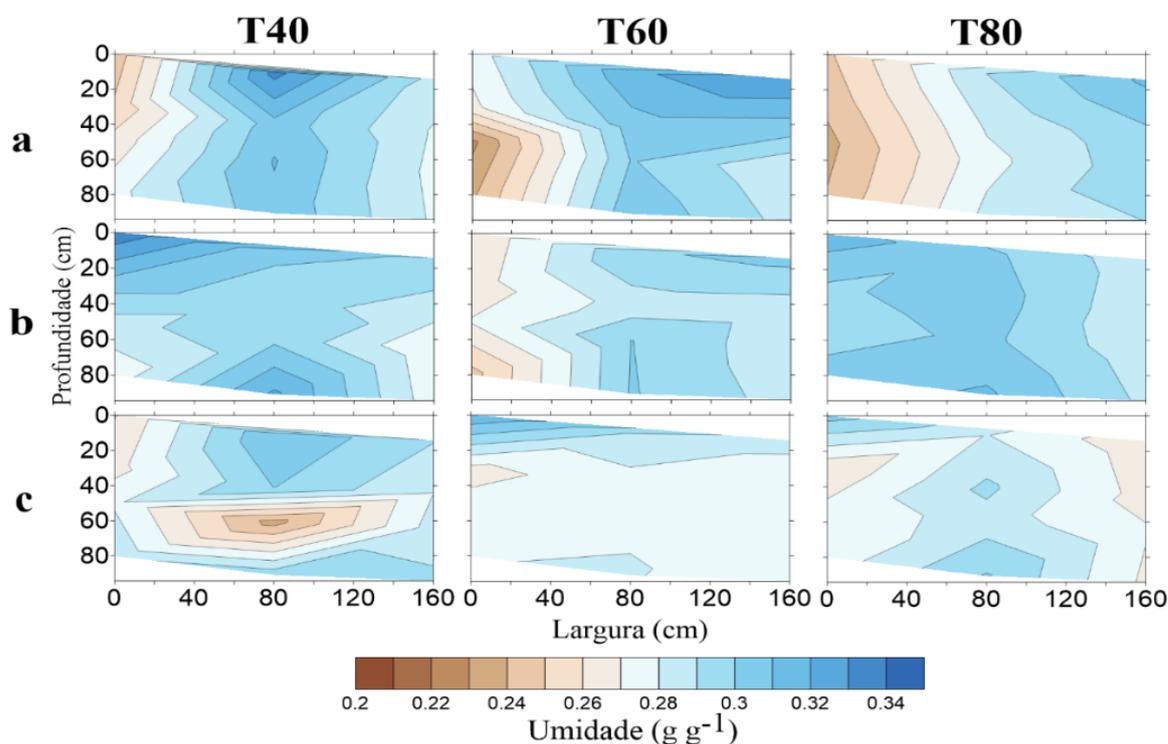
**Figura 13** - Resistência à penetração (*RP*) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix (60cm) + subsolador (80cm).

No T40 o efeito do preparo mecânico na redução da *RP*, mesmo após 4 anos, foi identificado até profundidades entre 30 e 40 cm, com valores de até 2,0 MPa (Figura 11). No T60, essa profundidade varia entre 45 e 55 cm para mesmo valor de *RP* (Figura 12). Já no T80 (Figura 13), como esperado, são observados valores abaixo de 2,0 MPa até a base de alguns dos perfis, evidenciando o efeito do subsolador (Mafes – DRENO).

No entanto, no T80 o efeito do subsolador (Mafes – DRENO) não foi identificado com clareza em todos os perfis. O subsolador, cuja haste de preparo é estreita, visa romper a estrutura do solo sem promover a mesma movimentação da massa de terra que o implemento utilizado para o preparo até 60 cm de profundidade (SCHNEIDER et al., 2017). Aliado a isso, as análises de penetrometria em campo podem não ter detectado os efeitos desse implemento em função do espaçamento horizontal entres os testes.

Silva et al. (2021), analisando os mesmos tratamentos, verificaram a ocorrência de áreas com baixos valores de condutividade hidráulica saturada ( $< 5 \text{ mm h}^{-1}$ ) em diferentes profundidades. Essas zonas foram encontradas em profundidades variando de 40 a 55 cm no T40, de 52 a 74 cm no T60 e de 70 a 80 cm no T80. Os autores destacaram que esse resultado decorre de altas pressões exercidas pelos implementos de preparo do solo no fundo dos sulcos de plantio, o que aliado a condições de umidade mais elevada, levou à compactação.

Apesar desses achados, não foram observadas evidências claras dessas zonas compactadas pelos testes de penetrometria. Cabe ressaltar que a condutividade hidráulica do solo é uma propriedade fortemente influenciada por alterações no espaço poroso, como modificação em sua conectividade e tortuosidade (MESQUITA; MORAES, 2004). Além disso, foi verificado que a umidade média do solo durante os testes de penetrometria em campo estava acima da *UOC* ( $0,24 \text{ g g}^{-1}$ ), e por vezes, acima da umidade onde se atinge o LP ( $0,27 \text{ g g}^{-1}$ ) (Figura 14).

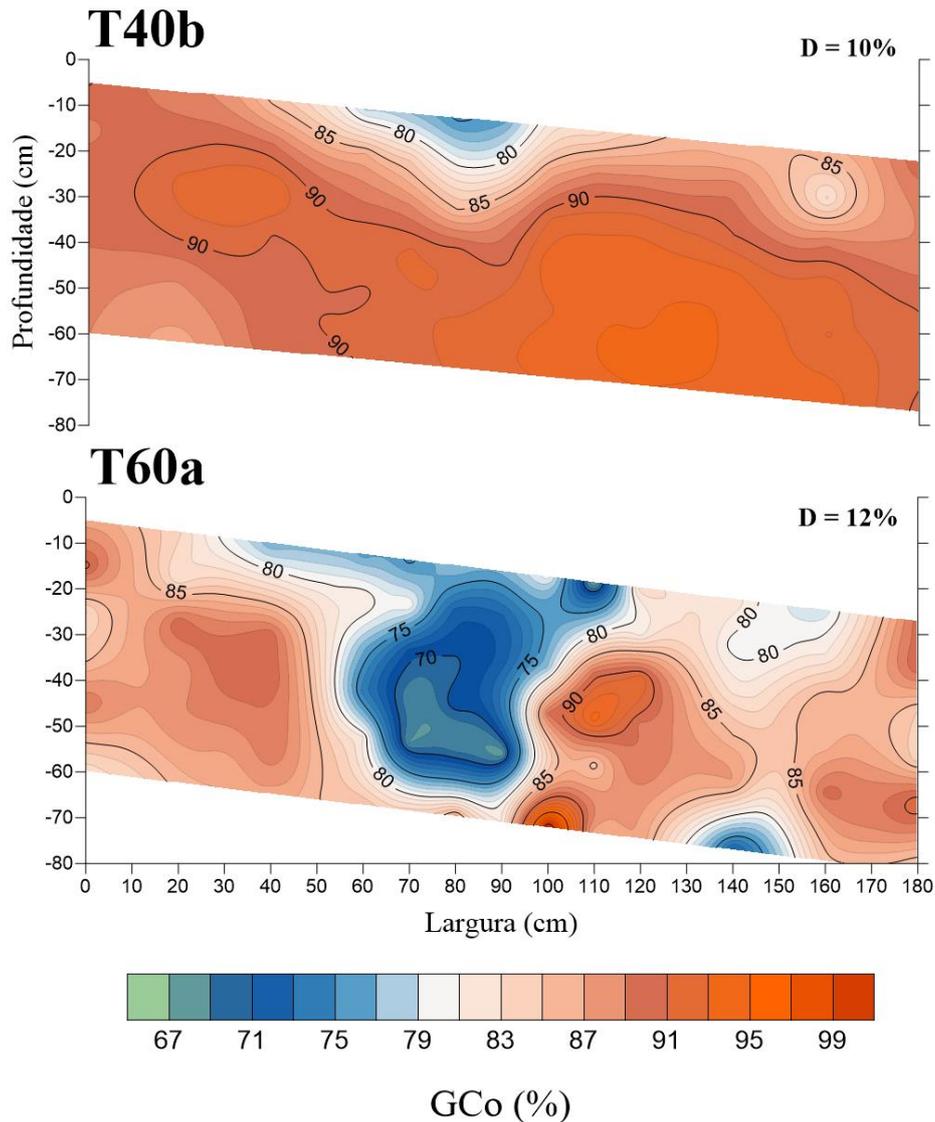


**Figura 14** - Umidade gravimétrica observada durante teste de penetrometria em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico. Malhas geradas por triangulação linear de 12 pontos amostrados para cada transecto.

Os perfis T40a, T40b, T60a e T80b foram os que apresentaram os maiores valores de  $U$ , e nesses perfis é possível observar certa homogeneidade quanto à  $RP$ . Solos com umidade atual próximo ou superior ao LP sofrem deformações mecânicas mais facilmente do que aqueles com teor de água menor do que esse limite (MILDE; DEDECEK; GAVA, 2010). A  $UOC$ , por sua vez, representa o conteúdo de água no qual se atinge a máxima densidade do solo para uma dada energia de compactação (HOWARD; SINGER; GREGORY, 1981). Assim, com o solo nessas condições, é esperado que o efeito de variações na  $D_s$  seja menos perceptível na análise de penetrometria.

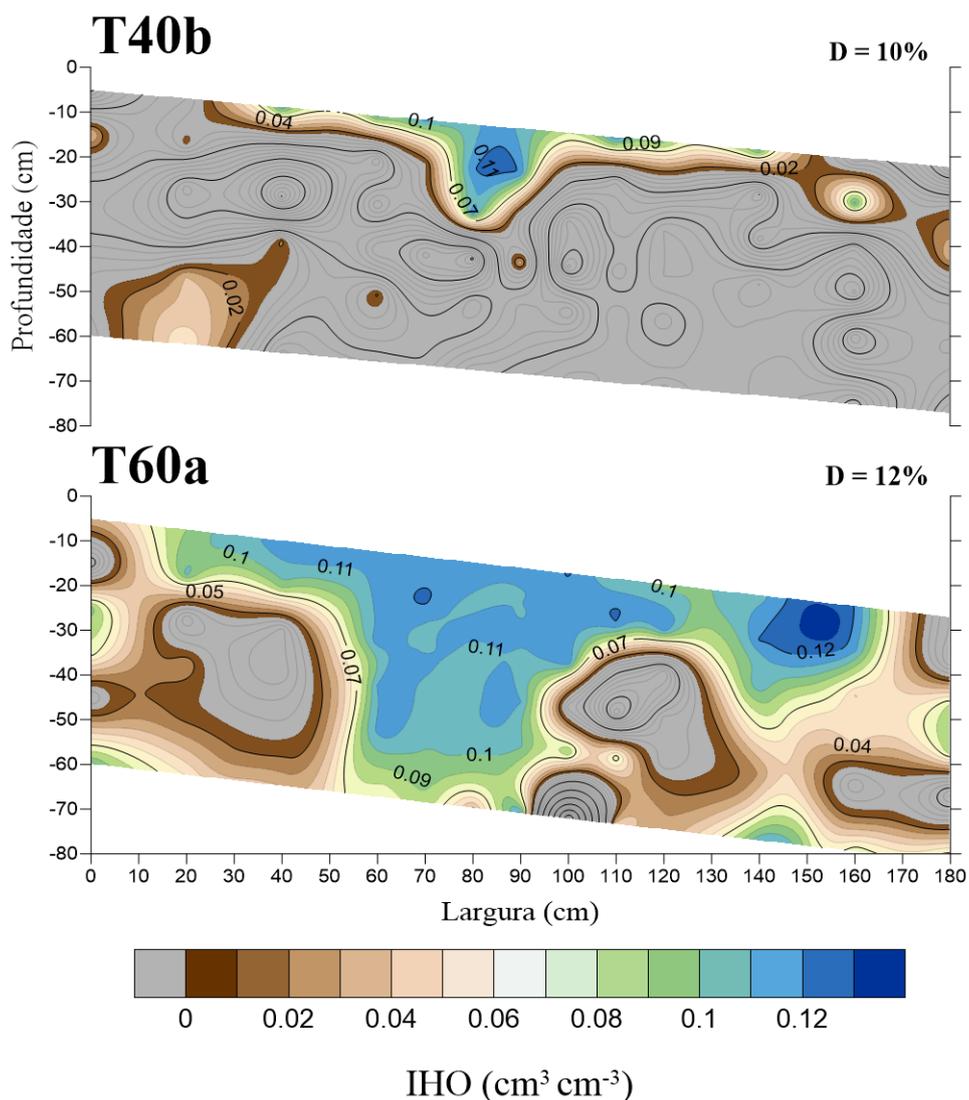
### 6.5 Grau de Compactação e Intervalo Hídrico Ótimo Observado

A partir das amostras com estrutura preservada coletadas nas trincheiras (cilindros com cerca de 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura) foram gerados os perfis de grau de compactação observado ( $GCo$ ) e intervalo hídrico ótimo observado ( $IHOo$ ) (Figuras 15 e 16). Observa-se clara semelhança entre os padrões apresentados pelos perfis de  $RP$  do T40b e T60a (Figuras 11 e 12) com os perfis de  $GCo$  dos respectivos tratamentos.



**Figura 15** - Grau de compactação observado ( $GCo$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: (T40b) grade aradora (20cm) + sulcador (40cm); (T60a) grade aradora (20cm) + mix(60cm).

Verifica-se, especialmente pela trincheira do T40b, que o solo sob estudo é naturalmente adensado, o que também foi relatado por estudos anteriores realizados na mesma área experimental (BARBOSA et al., 2020; SILVA et al., 2021). Em profundidades abaixo de 20 cm o  $GCo$  chegou próximo de 100 % ( $D_s = 1,54 \text{ g cm}^{-3}$ ), condição essa, de extrema limitação para o desenvolvimento de raízes e estabelecimento de plantas.



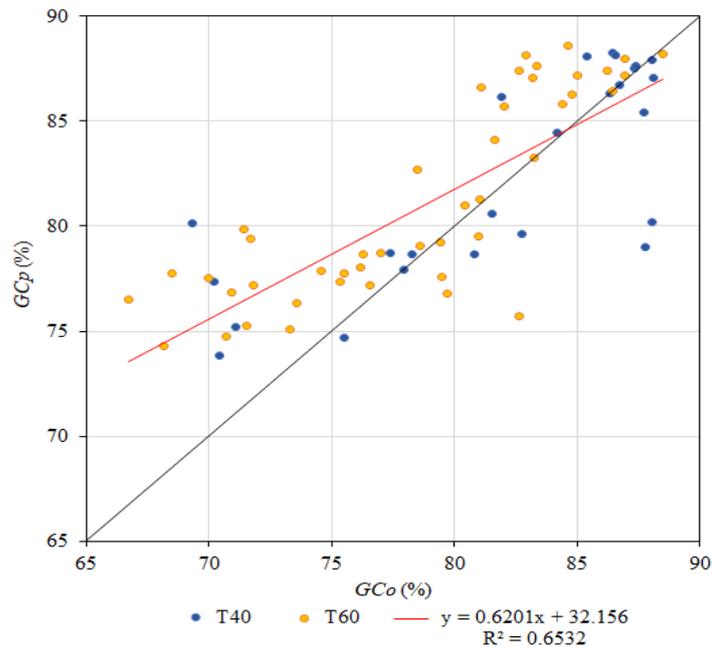
**Figura 16** - Intervalo hídrico ótimo observado (*IHO*<sub>o</sub>) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: (T40b) grade aradora (20cm) + sulcador (40cm); (T60a) grade aradora (20cm) + mix(60cm).

Observando a Figura *IHO*<sub>o</sub>, é notável o contraste entre os efeitos promovidos pelos diferentes métodos de preparo do sulco de plantio. Ambos os métodos foram eficazes na diminuição do *GCo*, afetando positivamente o *IHO*<sub>o</sub>. No entanto, utilização do mix para preparo até 60 cm promoveu maiores alterações estruturais, resultando em um maior volume de solo com condições físicas favoráveis para crescimento de raízes. Os efeitos do preparo do solo sobre o *IHO* dos tratamentos serão discutidos posteriormente no texto.

## 6.6 Correlação entre Grau de Compactação Predito e Observado

A partir dos parâmetros do modelo ajustado à *CRPu*, em conjunto com os perfis de *RP* e umidade, foram gerados os perfis de grau de compactação predito (*GCP*). A análise de correlação entre o *GCP* e o *GCo* dos perfis T40b e T60a é representada pela figura 17. Foram

apenas considerados valores que estavam contidos na faixa de valores  $GC$  das amostras que foram utilizadas para calibração.



**Figura 17** - Correlação entre o grau de compactação observado pela amostragem de material com estrutura preservada nas trincheiras ( $GCo$ ) e o grau de compactação predito pela  $CRPu$  ( $GCp$ ).

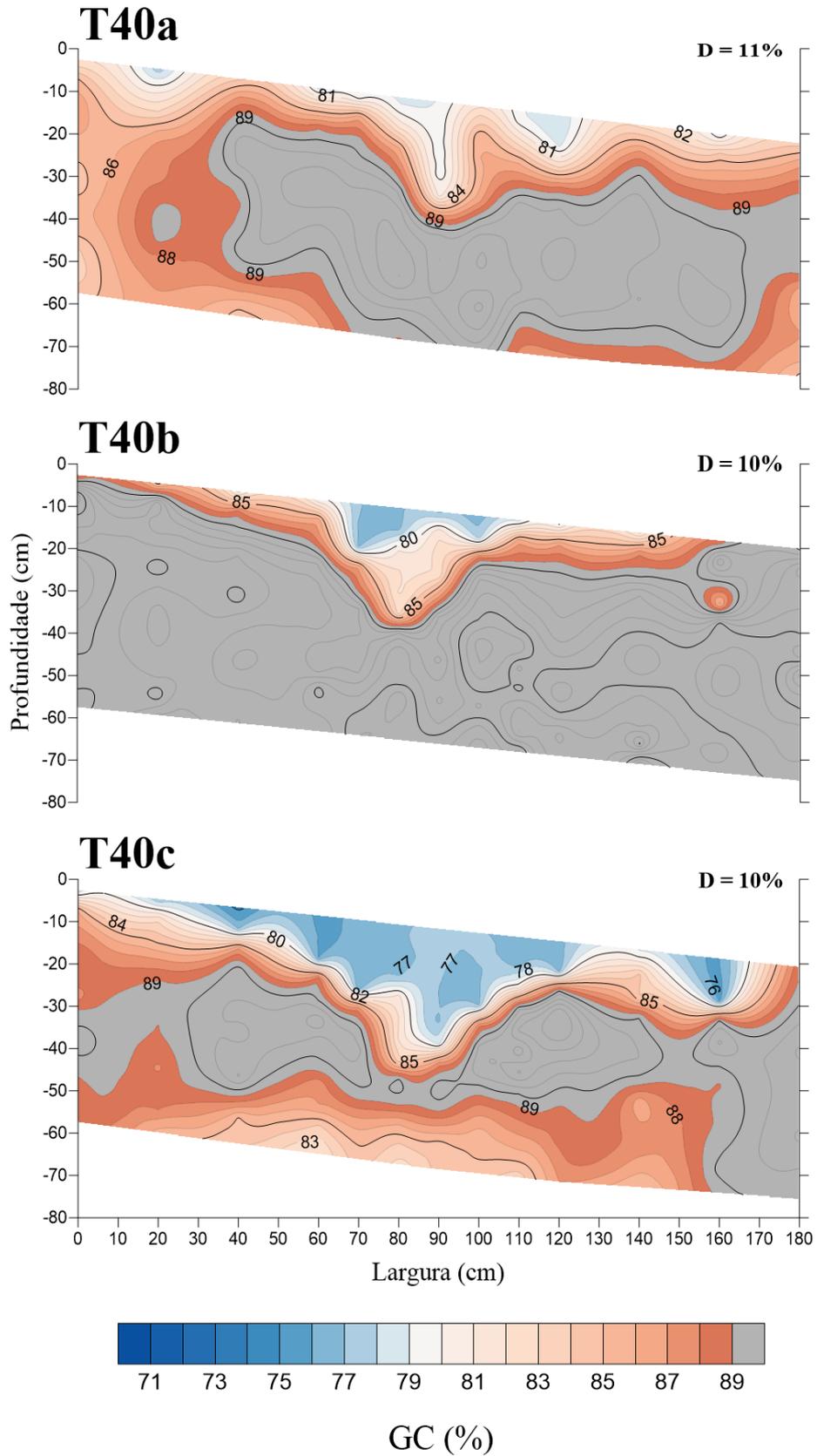
Houve a tendência de superestimar a  $GCp$  quando em valores mais baixos de  $GCo$ , no entanto, a partir da  $GCo$  de cerca de 84% a  $GCp$  tende a ser subestimado. Essa tendência à superestimativa da  $GCp$  em relação à  $GCo$  pode ter sido causa pela diferença entre os equipamentos em que se realizou a análise de penetrometria em campo e em laboratório. Para a calibração da  $CRPu$  foi utilizado um penetrógrafo de bancada, sendo este, considerado um penetrômetro de funcionamento estático, enquanto que em campo utilizou-se um penetrômetro de impacto, cujo funcionamento é classificado como dinâmico (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983).

As formas como esses equipamentos determinam  $RP$  são distintas, os penetrômetros estáticos registram a  $RP$  por unidade de área, enquanto que os penetrômetros dinâmicos registram por unidade de profundidade (BEUTLER; CENTURION; SILVA, 2007; HERRICK; JONES, 2002). Diversos trabalhos têm demonstrado que os penetrômetros de funcionamento dinâmico tendem a apresentar valores de  $RP$  maiores do que os penetrômetros de estáticos (BEUTLER; CENTURION; SILVA, 2007; ROBOREDO et al., 2010; STOLF, 1991). Assim, os maiores valores de  $RP$  registrados em campo convergiram para valores superestimados de  $GCp$  quando comparados com  $GCo$ .

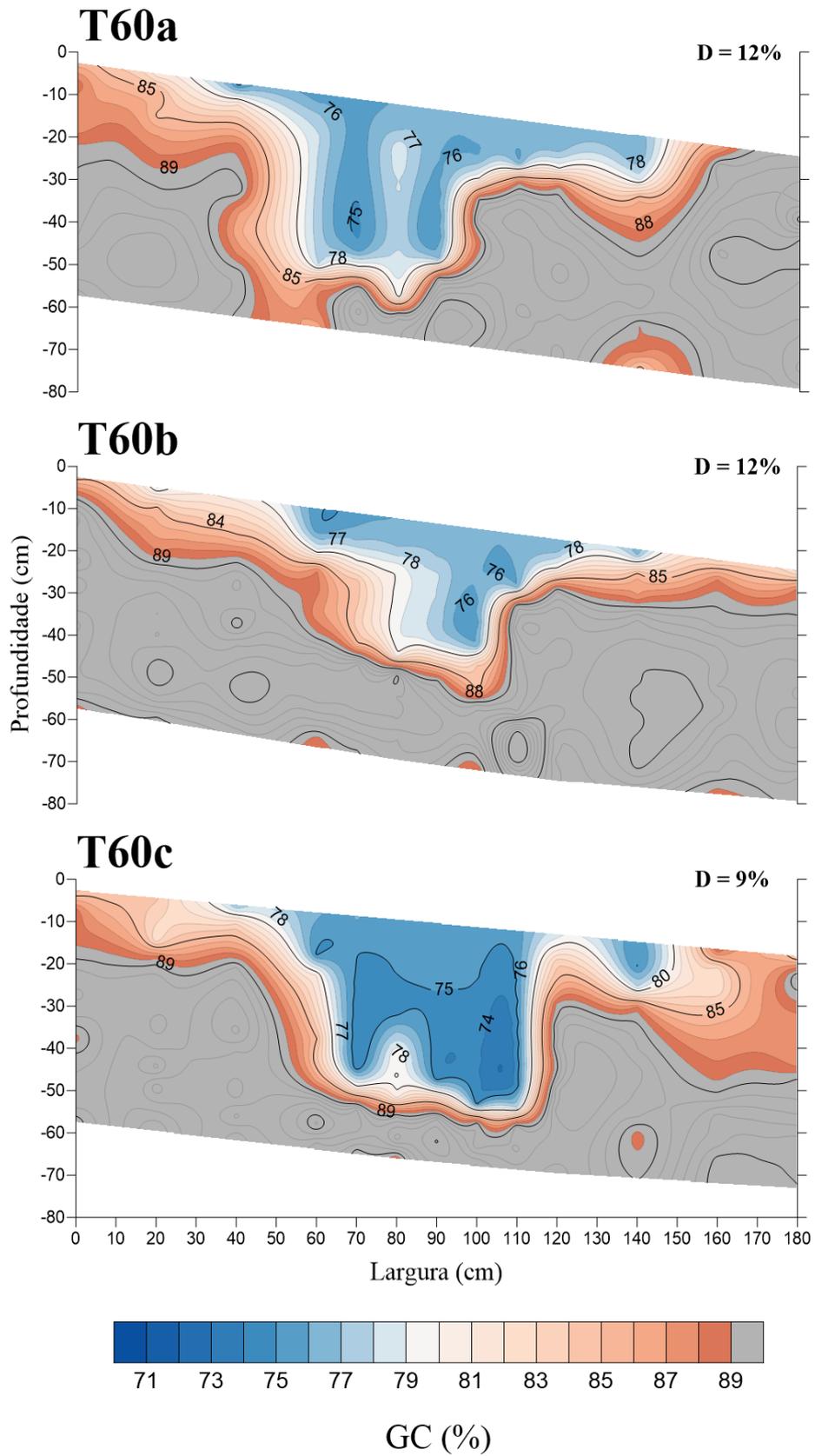
Além disso, em locais com baixa  $D_s$  como na área do sulco de plantio, a penetração no solo pelo penetrômetro de impacto se deu em resposta a poucos impactos do êmbolo. Dessa forma, a predição do  $GC$  por meio da  $RP$  em locais menos densos é menos precisa, sobretudo em condições de elevada umidade do solo como evidenciado pela  $CRPu$  (Figura 9). Em situação como essa, recomenda-se diminuir a massa do embolo de impacto ou a altura de queda, para prover maior acurácia na obtenção dos valores de  $RP$  (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983).

Cabe ressaltar que os teste de penetrometria em campo foram realizados em transectos adjacentes às trincheiras de coleta de amostras, a cerca de 20 cm de distância. Considerando o preparo do solo inicial, é esperado que este ambiente edáfico seja heterogêneo do ponto de vista estrutural, sobretudo nas bordas dos sulcos de plantio. Entretanto, por meio do coeficiente de correlação de Pearson, verificou-se correlação linear positiva forte ( $r=0.81$ ) entre os valores de  $GCp$  obtidos pela  $CRPu$  e os valores de  $GCo$  observados na coleta de amostras nas trincheiras (Figura 15).

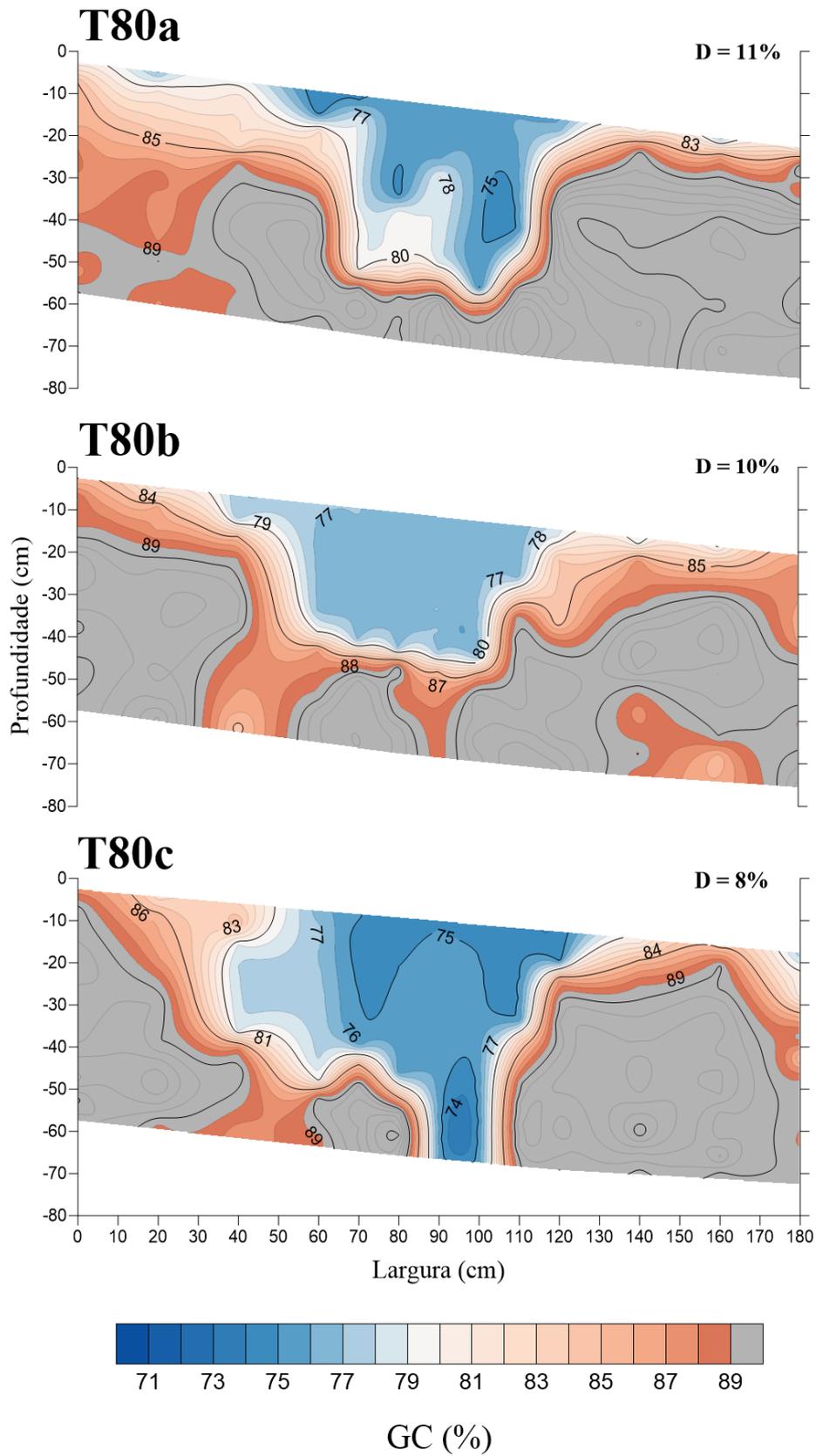
O  $GCp$  espacializado em função da  $RP$  medida nos diferentes perfis de sulco de plantio do cafeeiro estão apresentados a seguir (Figura 18, 19 e 20). As áreas em cor cinza representam valores de  $GC$  acima dos valores observados nas amostras utilizadas nas calibrações dos modelos.



**Figura 18** - Grau de compactação predito ( $GC_p$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + sulcador (40cm).



**Figura 19** - Grau de compactação predito ( $GC_p$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix(60cm).

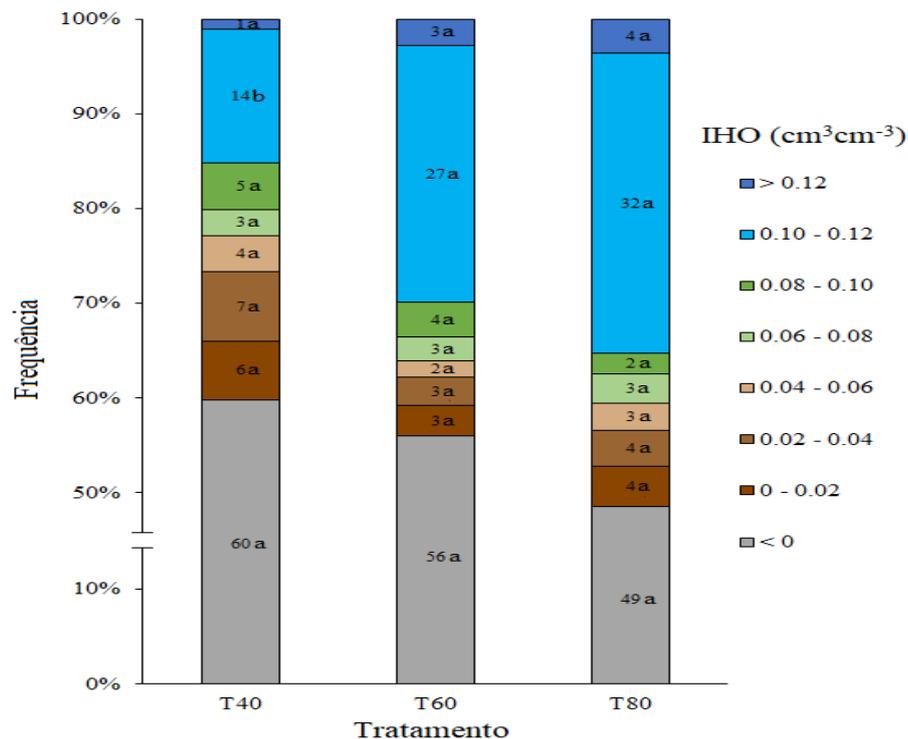


**Figura 20** - Grau de compactação predito ( $GC_p$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix (60cm) + subsolador (80cm).

O menor valor de  $GCp$  verificado nos perfis foi de cerca de 73% nas áreas dentro do sulco de plantio do T60c e T80c. Os menores valores de  $GCo$  observados no T40b e T60a foram 69 e 67%, enquanto que o  $GCp$  nos mesmos perfis foi de 76 e 75% respectivamente. Esses valores mais baixos de  $GC$  ocorrem majoritariamente dentro dos sulcos de plantio. Como discutido anteriormente, em zonas de baixa densidade, associada a umidade mais elevada, a sensibilidade do penetrógrafo é reduzida, podendo acarretar em erros.

## 6.7 Avaliação dos Tratamentos

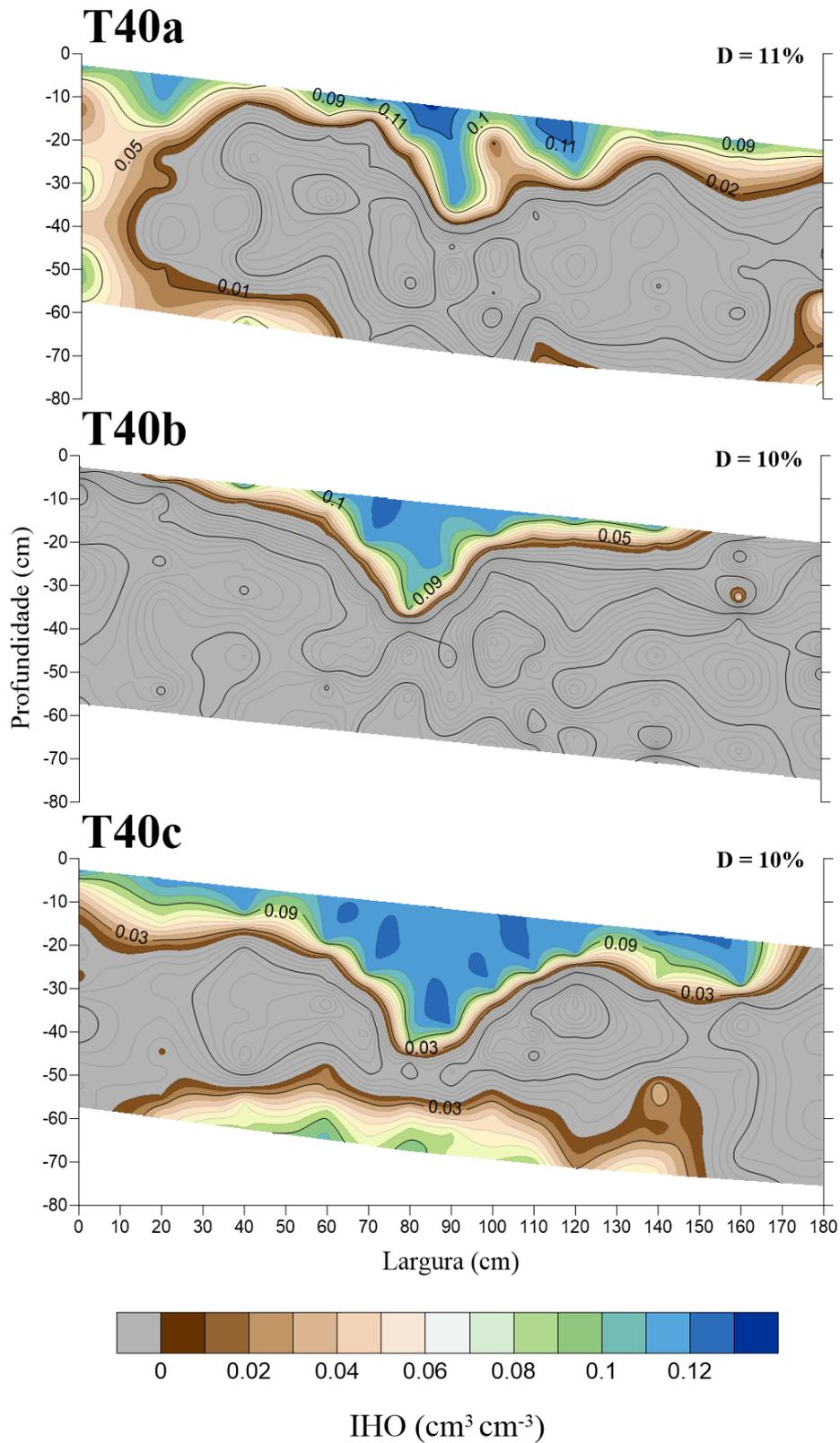
A partir dos dados dos perfis de  $RP$  (Figuras 11, 12 e 13) que foram transformados em  $Dsp$  (Equação 14) foram gerados os perfis de  $IHO$  (Figuras 22, 23 e 24). Os dados utilizados para gerar os perfis de  $IHO$  foram divididos arbitrariamente em oito faixas de valores, e sua ocorrência é apresentada na figura 21. Verificou-se diferença estatística significativa apenas para o  $IHO$  de 0,10 até 0,12  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ , onde o T40 difere dos demais tratamentos. Esses valores de  $IHO$  estão compreendidos entre os  $GC$  de 67 e 82% (Figura  $IHO$  B), e é nesta amplitude de  $GC$  que se observa variação positiva do  $IHO$  até seu máximo ( $Dsa = 1,23 \text{ g cm}^{-3}$ ).



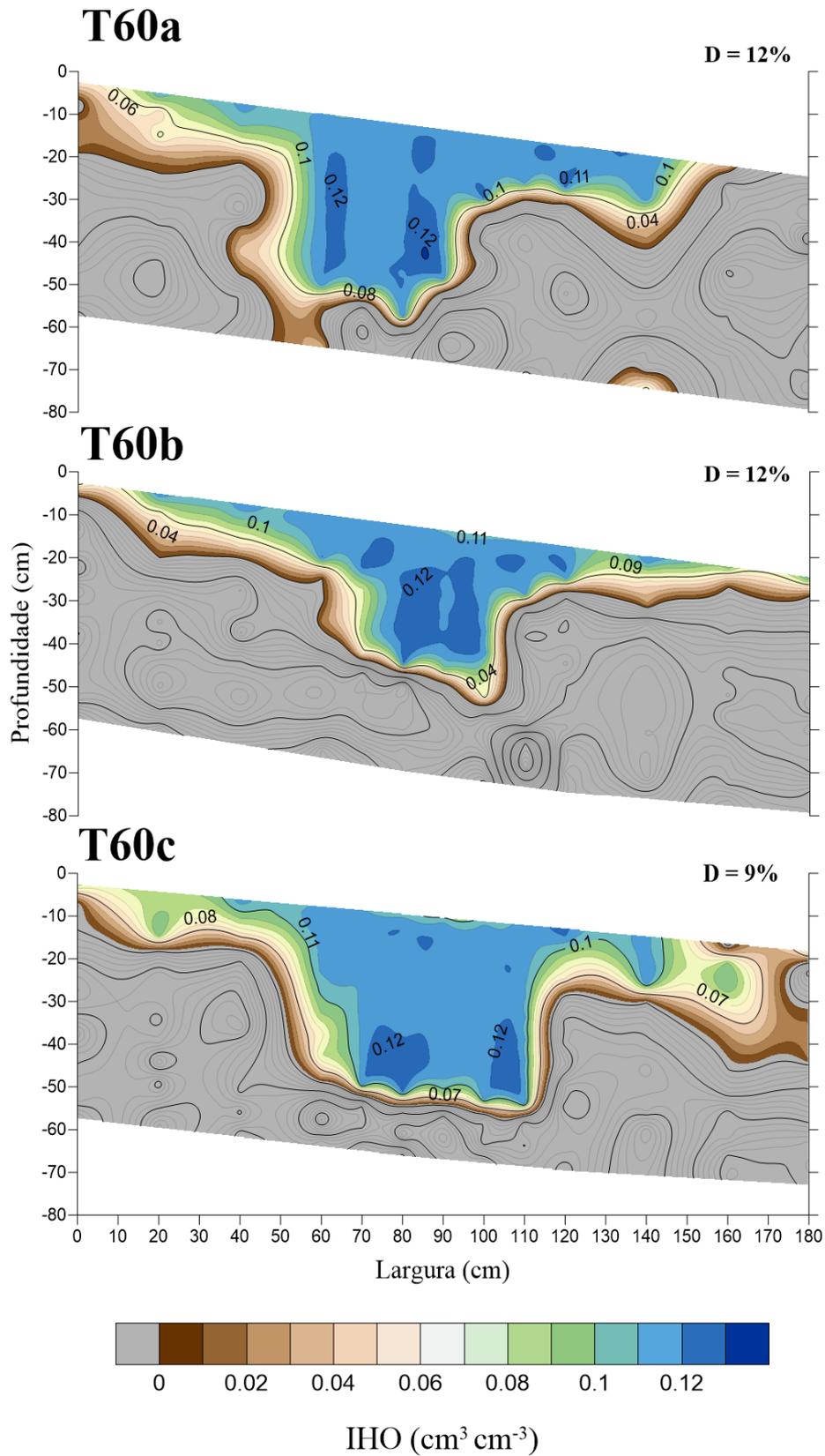
**Figura 21** - Ocorrência de valores de intervalo hídrico ótimo ( $IHO$ ) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: (T40) grade aradora (20cm) + sulcador (40cm); (T60) grade aradora (20cm) + mix(60cm); (T80) grade aradora (20cm) + mix(60cm) + subsolador (80cm).

A ocorrência de  $IHO$  acima de 0,10  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  foi verificada com maior frequência justamente nas áreas onde se encontram os sulcos de plantio, como observado nas figuras 22,

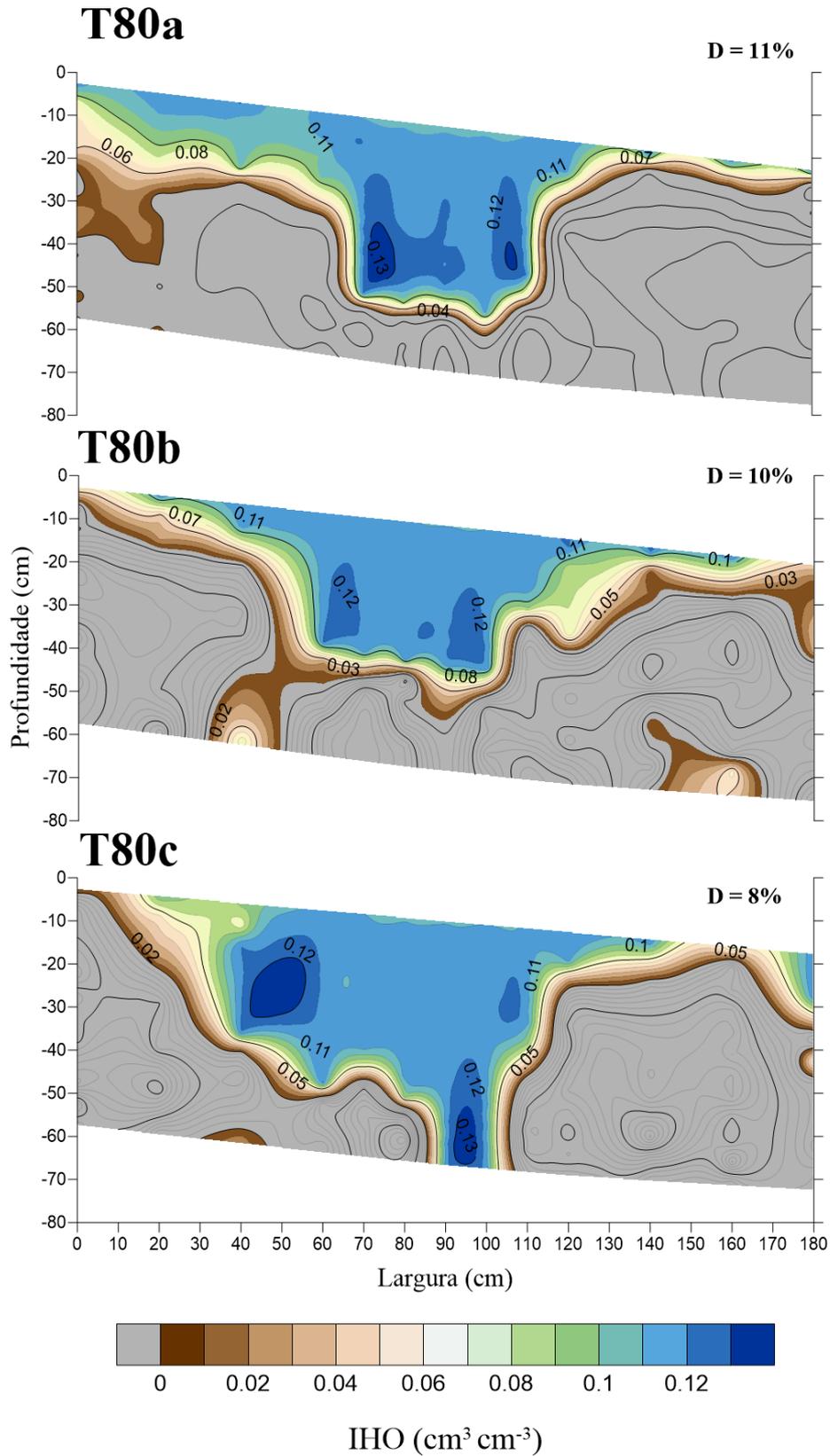
23 e 24. Assim, fica evidente o efeito positivo do preparo mecânico nas propriedades físico-hídricas do solo, corroborando com estudos anteriores realizados na mesma área experimental (BARBOSA et al., 2020; SILVA et al., 2021).



**Figura 22** - Intervalo hídrico ótimo (*IHO*) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + sulcador (40cm).



**Figura 23** - Intervalo hídrico ótimo (*IHO*) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix(60cm).



**Figura 24** - Intervalo hídrico ótimo (IHO) em perfis de sulco de plantio de cafeeiro em um Cambissolo Háplico Distrófico - Método de preparo do solo: grade aradora (20cm) + mix (60cm) + subsolador (80cm).

Os valores de *IHO* abaixo de  $0,10 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  ocorrem em estreitas faixas nas bordas dos sulcos de plantio, onde é observado redução abrupta de valores (Figuras 22, 23 e 24). Nessas áreas o decréscimo do *IHO* é mais acentuado devido às limitações na aeração do solo e pelo impedimento mecânico resultante de um maior *GC* (Figura *IHO B*). Quanto mais restritivas forem as condições físico-hídricas, maior será a probabilidade de a umidade do solo não estar compreendida dentro *IHO*, comprometendo assim o crescimento vegetal (SILVA; KAY, 1996).

Não foi observada diferença estatística significativa entre os tratamentos para os valores de *IHO* não compreendidos no intervalo entre  $0,10$  e  $0,12 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  (Figura 21). Além disso, cabe ressaltar a própria variação observada entre os perfis pertencentes ao mesmo tratamento, com especial destaque para o T40, o que contribuiu para tal resultado. Nesse tratamento foi observado valores de *IHO* acima de zero que certamente não são decorrentes do preparo do solo por ocorrerem em profundidades maiores do que as atingidas pelo implemento de abertura do sulco de plantio (Figura 22).

Os tratamentos T60 e T80 não diferiram estatisticamente entre si, o que pode ser atribuído ao implemento utilizado para abertura do sulco na profundidade avaliada (60 cm). O preparo mecânico realizado pelo mix (Mafes – BIG MIX AS-2) nesses dois tratamentos promoveram a mistura do material de subsolo com camadas mais superficiais do solo, resultando em perfis de sulco de plantio semelhantes entre si. Além disso, o preparo do solo até 80 cm foi utilizado um subsolador (Mafes – DRENO), esse implemento mecânico, visa romper a estrutura do solo e diminuir a *Ds* sem virar ou misturar as camadas (SCHNEIDER et al., 2017), sendo seu efeito fortemente influenciado pela umidade do solo em profundidade.

No entanto, foi observada uma tendência de melhores condições físicas no T80 quando comparado ao T60 (Figura 21), que apesar de não ser estatisticamente conclusiva para este trabalho, pode ser um indicativo de incremento em qualidade física do solo. Silva et al. (2021), em estudo desenvolvido na mesma área experimental verificaram que a infiltração em condição de solo saturado foi maior no T80 do que no T60 e T40. Além disso, há indícios de rompimento de impedimentos físicos em maiores profundidade no T80, com destaque para os perfis T80b e T80c (Figuras 20 e 24). O adequado preparo do sulco de plantio possibilita o crescimento de raízes em maiores profundidades (SILVA et al., 2017a), permitindo a absorção de água armazenada em camadas mais profundas do solo (SERAFIM et al., 2013c; SILVA et al., 2015b).

## 7 CONCLUSÕES

A análise de penetrometria realizada em campo e em laboratório como forma alternativa para estimar  $D_s$  e inferir sobre a qualidade física do perfil do sulco de plantio do cafeeiro se mostrou um método viável e eficaz.

A qualidade dos resultados das análises de penetrometria é dependente da faixa de umidade em que estas são realizadas: umidades inferiores ao LC do solo leva a erros de leitura de  $RP$ , seja em campo ou em laboratório; condições de umidades do solo acima da  $UOC$  ou próximas do LP devem ser evitadas. Os valores do  $GC$  preditos tenderam a ser superestimados pela penetrometria em zonas de menores densidades dentro dos sulcos de plantio.

Com o aumento do  $GC$  observou-se redução no volume de água retido sob menores energias de retenção, como resultado da redução do volume de macroporos. A inclinação observada nas  $CRAs$  mostrou indícios de degradação física do solo, com índice  $S$  variando de 0,025 até 0,058 para o maior e menor  $GC$  respectivamente.

Foi verificado aumento do  $IHO$  em decorrência do aumento do  $GC$  até cerca de 80%, sendo este, considerado como o  $GC$  ótimo do sulco de plantio para este estudo. A porosidade de aeração foi o primeiro fator a se tornar limitante no  $IHO$ , seguida pela impedância mecânica nos  $GC$  de 80 e 85% respectivamente. Valores de  $GC$  próximos ou acima de 88% ( $D_{sc} = 1,36 \text{ g cm}^{-3}$ ) representam uma condição de extrema limitação ao crescimento do cafeeiro neste solo.

Os métodos de abertura de sulcos de plantio de todos os tratamentos avaliados foram determinantes para garantir uma melhor qualidade física do solo, mesmo após quatro anos de preparo. Os tratamentos cujo preparo do sulco de plantio foi realizado com mix apresentaram maior volume de solo potencialmente explorável pelas raízes.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR NETTO, A. O.; NACIF, P. G. S.; REZENDE, J. O. Avaliação do conceito de capacidade de campo para um latossolo amarelo coeso do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 661–667, 2014.

AITA, R. A. et al. Método alternativo para a determinação do limite de contração a partir de pastilha parafinada em um Argissolo Vermelho Distrófico Arênico. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 20, n. 1, p. 156–165, 2016.

ALMEIDA, B. G. et al. Densidade do Solo. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3º ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 574.

ALMEIDA, W. S. DE et al. Sediment production and soil water infiltration under

different simulated rainfall characteristics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 8, p. 572–578, ago. 2019.

AMARAL, F. C. S. DO et al. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2004.

ANDRADE, A. P. et al. Atributos químicos de um cambissolo húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 5, p. 814–821, 2012.

ANDRADE, M. L. DE C. et al. Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 191–200, 2017.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 382–388, 2009.

ANTUNES, F. Z. Caracterização climética do Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 12, n. 138, p. 9–13, 1986.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337–345, 2004.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for Assessing Soil Quality**. SSSA Special Publications. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1996. p. 123–141.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: [s.n.].

AVANZI, J. C. et al. Aggregate stability in soils cultivated with eucalyptus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 89–96, 2011.

BARBOSA, S. M. et al. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. **Geoderma**, v. 357, n. August 2019, p. 113934, 2020.

BATY, F. et al. A Toolbox for Nonlinear Regression in R: The package nlstools. **Journal of Statistical Software**, v. 66, n. 5, p. 1–21, 2015.

BERGAMIN, A. C. et al. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 3, p. 681–691, 2010.

BERNARDES, T. et al. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no estado de Minas Gerais - Brasil. **Coffee Science**, v. 7, n. 2, p. 139–151, 2012.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV, 1995.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico Álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciencia Rural**, v. 30, n. 1, p. 91–95, set. 2000.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155–163, fev. 2004.

BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 971–982, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 146–151, abr. 2007.

BLAINSKI, E. et al. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho Distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 273–281, 2009.

BLAINSKI, É. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975–983, jun. 2008.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração de Água no Solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination**. Washington DC: [s.n.].

BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I - Fracionamento sequencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 935–944, 2005.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 33, n. 2, p. 519–524, 1990.

CAMARGO, Â. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65–68, 2001.

CAMARGO, M. B. P. DE. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239–247, 2010.

CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos

utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 4, p. 77–86, 2011.

CARDUCCI, C. E. et al. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 2, p. 291–302, 2013.

COLOMBI, T. et al. Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. **Plant Physiology**, v. 174, n. 4, p. 2289–2301, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café. **Quarto levantamento**, v. 5, n. 4, p. 1–44, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café. **Primeiro levantamento**, v. 6, n. 1, p. 1–62, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café. **Observatório Agrícola**, v. 5, n. 6, p. 1–45, dez. 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café. **Observatório Agrícola**, v. 8, n. 2, p. 1–63, maio 2021.

CORADO NETO, F. DA C. et al. Variabilidade espacial da resistência à penetração em neossolo litólico degradado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1353–1361, 2015.

CUNHA, E. D. Q. et al. Atributos físicos do solo sob diferentes preparos e coberturas influenciados pela distribuição de poros Soil physical attributes under different tillage systems and cover crops , as influenced by pore distribution. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 62, p. 1160–1169, 2010.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na agricultura**, v. 10, n. 1, p. 1–7, 2002.

DA SILVA, W. M.; BIANCHINI, A.; DA CUNHA, C. A. D. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 449–459, 2016.

DALMAGO, G. A. et al. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 855–864, 2009.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 485–510, 2007.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n.

1, p. 55–81, 2006.

DE CAMARGO, Â. P. Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões (cafeeiras) do Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 20, n. 7, p. 831–839, 1985.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3–4, p. 227–239, jun. 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3–4, p. 201–214, 1 jun. 2004b.

DEXTER, A. R. et al. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoder**, v. 143, p. 243–253, 2008.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Metodologia para determinação do limite de contração modificada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 22, n. 3, 1998.

DIAS JUNIOR, M. DE S. et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 343–349, 2003.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175–182, 1996.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO, P. J. **Model-based Geostatistics**. 1. ed. New York, NY: Springer New York, 2007.

DO NASCIMENTO, M. N. et al. Alterações bioquímicas de plantas e morfológicas de gemas de cafeeiro associadas a eventos do florescimento em resposta a elementos meteorológicos. **Ciencia Rural**, v. 38, n. 5, p. 1300–1307, 2008.

DONAGEMMA, G. K. et al. Análise Granulométrica. In: **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3º ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 574.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. **Statistical Science**, v. 1, n. 1, p. 54–75, 1986.

FERNANDES, A. L. T. et al. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 231–240, 2012.

FURTADO, C. **FORMAÇÃO ECONÔMICA DO BRASIL**. 32. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2005.

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1069–1079, 2010.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer: Powerful Contouring, Gridding, & 3D Surface**

**Mapping Software**, 2016.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; DA SILVA, A. P. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, v. 207–208, n. 1, p. 99–110, 2013.

GUÉRIF, J. et al. A review of tillage effects on crop residue management , seedbed conditions and seedling establishment. **Soil & Tillage Research**, v. 61, p. 13–32, 2001.

GUIMARÃES, R. M. L. et al. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1512–1521, 2013.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71–85, 2000.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 4, p. 1320–1324, 2002.

HORTA, I. DE M. F. et al. Levantamento de reconhecimento com apoio digital dos solos do município de nazareno-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 1, p. 1940–1947, 2009.

HOWARD, R. F.; SINGER, M. J.; GREGORY, A. Effects of soil properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California Forest and Range Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 2, p. 231–236, 1981.

HUBERT, F. et al. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, v. 142, n. 1–2, p. 226–236, nov. 2007.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. DA; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1493–1500, jul. 2000.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION (ICO). COFFEE DEVELOPMENT REPORT. p. 80, 2019.

KAY, B. D.; VANDENBYGAART, A. J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 107–118, 2002.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 5, n. 1, p. 26–32, 2006.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 857–867, 2002.

LAPEN, D. . et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, v. 78, n. 2, p. 151–170, ago. 2004.

LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 415–422, jun. 2004.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277–294, 1958.

MEDINA, C.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; CORTÉS, C. A. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 91–101, fev. 2012.

MENDONÇA, R. F. et al. Abordagem sobre a bienalidade de produção em plantas de café. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 1–9, 2011.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p. 963–969, 2004.

MILDE, G. A.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Unidades dee colheita : Estratégia para evitar a compactação dos solos florestais. **Revista Árvore**, v. 34, p. 1075–1083, 2010.

MOME FILHO, E. A. et al. Compared performance of penetrometers and effect of soil water content on penetration resistance measurements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 744–754, 2014.

MOREIRA, P. C. et al. Produtividade e economia de fatores de produção na cafeicultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 6–21, 2019.

MOTA, J. C. A.; DE ALENCAR, T. L.; DE ASSIS JÚNIOR, R. N. Alterações físicas de um Cambissolo cultivado com bananeira irrigada na chapada do Apodi, Ceará. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1015–1024, 2015.

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 2, p. 327–336, 2004.

OTTO, R. et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201–210, dez. 2011.

PAZ, V. P. DA S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 465–473, 2000.

PEIXOTO, D. S. et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 745, p. 140887, 2020.

PERDONÁ, M. J. et al. Irrigação e certificação da cafeicultura na região Centro-Oeste de São Paulo. **Bragantia**, v. 71, n. 3, p. 377–384, 2012.

PFLEGER, P.; CASSOL, P. C.; MAFRA, Á. L. Substâncias húmicas em Cambissolo sob vegetação natural e plantios de pinus em diferentes idades. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 807–817, 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RAGHAVAN, G. S. V. et al. Prediction of Soil Compaction Due to Off-Road Vehicle Traffic. **Transactions of the ASAE**, v. 19, n. 4, p. 0610–0613, 1976.

RALISCH, R. et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 381–384, 2008.

RAMOS, F. T. et al. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: com e sem reúso de amostras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 129–137, 2013.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating Soil Water Retention from Soil Physical Properties and Characteristics. **Advances in Soil Science**, v. 16, p. 213–234, 1991.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 12, p. 211–216, 1988.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, v. 11, n. 126, p. 26–40, 1985.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6. ed. [s.l.] UFLA, 2014.

RICHARD, G. et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil : Influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, v. 52, p. 49–58, 2001.

ROBOREDO, D. et al. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 308–314, abr. 2010.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 1, p. 105–114, 2011.

SANTOS, H. G. DOS et al. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011.

SANTOS, F. L.; DE JESUS, V. A. M.; VALENTE, D. S. M. Modelagem da resistência à penetração do solo usando análises estatísticas e redes neurais artificiais. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 34, n. 2, p. 219–224, 2012.

SANTOS H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5° ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SARAIVA, C. E. DO A. et al. Competitividade da cafeicultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 9–16, 2018.

SCHNEIDER, F. et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? **Soil and Tillage Research**, v. 174, n. February, p. 193–204, 2017.

SERAFIM, M. E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 6, p. 964–977, 2011.

SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, p. 733–742, 2013a.

SERAFIM, M. E. et al. Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1640–1652, 2013b.

SERAFIM, M. E. et al. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 362–370, 2013c.

SEVERIANO, E. C. et al. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 39–45, 2010.

SEVERIANO, E. DA C. et al. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 1, p. 159–168, 2009.

SEVERIANO, E. DA C. et al. Structural changes in latosols of the cerrado region: I - relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 773–782, 2011.

SEVERIANO, E. DA C. et al. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 193, 2013.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting

water range of soils. **Plant and Soil**, v. 184, n. 2, p. 323–329, jun. 1996.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p. 1775–1781, 1994.

SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103–113, 2015a.

SILVA, B. M. et al. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 1, p. 39–47, 2015b.

SILVA, B. M. et al. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil and Tillage Research**, v. 189, n. November 2018, p. 36–43, jun. 2019.

SILVA, É. A. DA et al. Root spatial distribution in coffee plants of different ages under conservation management system. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 49, p. 4970–4978, 2017a.

SILVA, R. F. DA et al. Changes in soil profile hydraulic properties and porosity as affected by deep tillage soil preparation and Brachiaria grass intercropping in a recent coffee plantation on a naturally dense Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 213, n. November 2020, 2021.

SILVA, R. F. et al. Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo ( Oxisol ). **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, p. 109–124, 2017b.

SILVEIRA, D. DE C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 3, p. 659–667, 2010.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229–235, 1991.

STOLF, R. et al. Penetrômetro de impacto stolf - Programa computacional de dados em excel-VBA. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 3, p. 774–782, 2014.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. **Série Penetrômetro de Impacto**, n. 1, p. 9, 1983.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, 2007.

TABBAGH, A. et al. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization. **Geoderma**, v. 97, n. 3–4, p. 393–404, set. 2000.

TEIXAIRA, W. G.; BEHRING, S. B. Reteção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3° ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 34–46.

TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795–801, dez. 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, n. 4, p. 573–581, dez. 1998.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, p. 892–898, 1980.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: [s.n.].

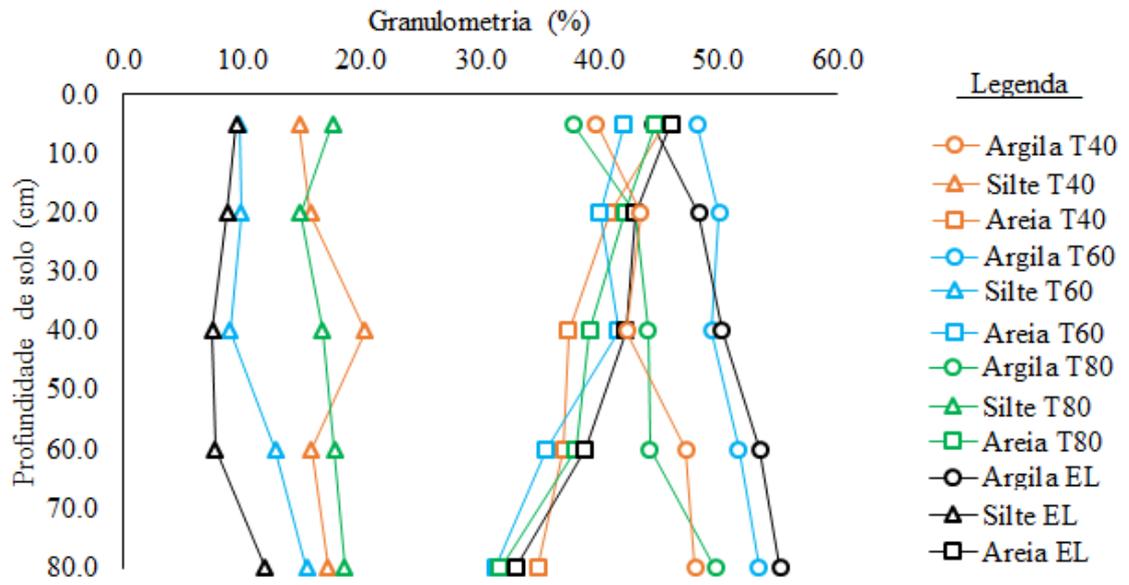
VAZ, C. M. P. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.

VEIHMEYER, F.; HENDRICKSON, A. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, v. 32, p. 181–194, 1931.

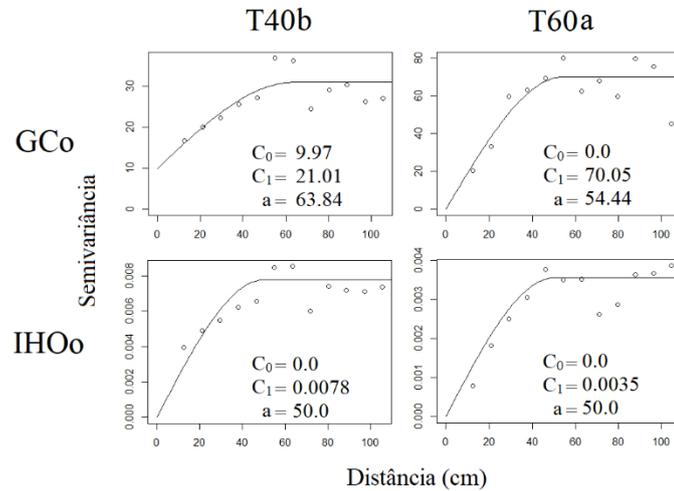
VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 11–19, fev. 2004.

## 9 APÊNDICES

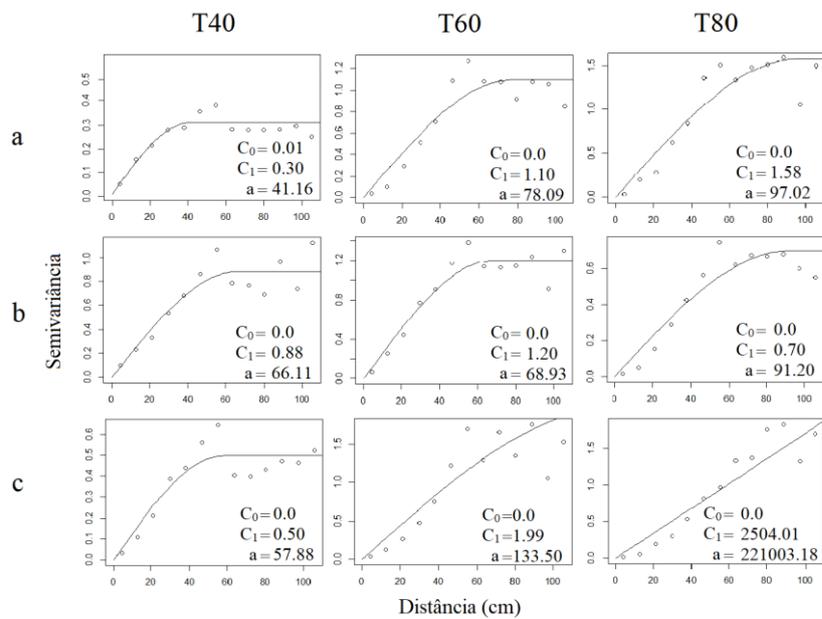
**APÊNDICE A** – Análise granulométrica em um Cambissolo Háplico Distrófico manejado na cafeicultura com diferentes profundidades de preparo do sulco de plantio: T40 (40 cm); T60 (60 cm); e T80 (80 cm).



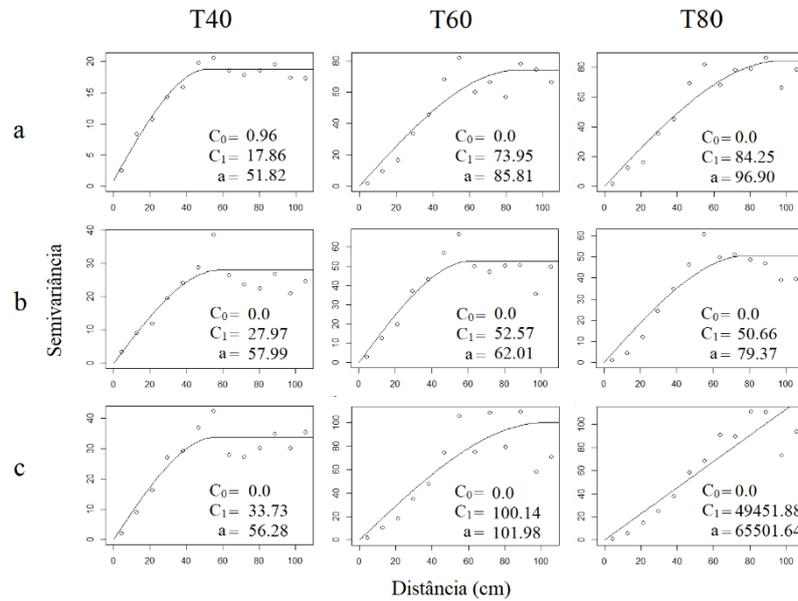
**APÊNDICE B** - Semivariogramas experimentais ajustados para grau de compactação (GOo) Intervalo hídrico ótimo observado (IHOo) em um Cambissolo Háplico Distrófico.  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_1$  é a contribuição e  $a$  é o alcance.



**APÊNDICE C** - Semivariogramas experimentais ajustados para resistência do solo à penetração (RP) de perfis de sulco de plantio em um Cambissolo Háplico Distrófico.  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_1$  é a contribuição e  $a$  é o alcance.



**APÊNDICE D** - Semivariogramas experimentais ajustados para grau de compactação (*GC*) de perfis de sulco de plantio em um Cambissolo Háplico Distrófico.  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_1$  é a contribuição e  $a$  é o alcance.



**APÊNDICE E** - Semivariogramas experimentais ajustados para intervalo hídrico ótimo (*IHO*) de perfis de sulco de plantio em um Cambissolo Háplico Distrófico.  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_1$  é a contribuição e  $a$  é o alcance.

