

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL**

**JOABE MARTINS DE SOUZA**  
*Magister Scientiae*

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM  
LAVOURA DE CAFÉ CONILON SUBMETIDA À  
SUBSOLAGEM**

**SÃO MATEUS - ES  
2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL**

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM  
LAVOURA DE CAFÉ CONILON SUBMETIDA À  
SUBSOLAGEM**

**JOABE MARTINS DE SOUZA**

*Magister Scientiae*

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Robson Bonomo

**SÃO MATEUS - ES  
2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S729a Souza, Joabe Martins de, 1987-  
Atributos físico-hídricos do solo em lavoura de café conilon  
submetida à subsolagem / Joabe Martins de Souza. – 2013.  
75 f. : il.

Orientador: Robson Bonomo.  
Coorientador: Fábio Ribeiro Pires.  
Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário  
Norte do Espírito Santo.

1. Solos - Manejo. 2. Hidráulica agrícola. 3. Água na  
agricultura. 4. Solos – Conservação. 5. Café conilon. I. Bonomo,  
Robson. II. Pires, Fábio Ribeiro. III. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV.  
Título.

CDU: 63

---

# Atributos físico-hídricos do solo em lavoura de café conilon submetida à subsolagem

**Joabe Martins de Souza**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Aprovada: 21/02/2013.



---

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de  
Oliveira  
Universidade Federal de Lavras



---

Prof. Dr. Fábio Ribeiro Pires

Universidade Federal do Espírito Santo



---

Prof. Dr. Edney Leandro da Vitória  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Prof. Dr. Robson Bonomo  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

Aos meus queridos pais, Joel Batista de Souza e Maria Rosa Martins de Souza, pelo amor e apoio e pelo muito que representaram pra mim.

**DEDICO...**

## **AGRADECIMENTOS**

Por ter conseguido realizar este trabalho, a Deus que me deu força, responsabilidade e determinação para não desistir jamais.

À universidade Federal do Espírito Santo – UFES e ao Centro Universitário Norte do Espírito Santo – CEUNES, pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Ao CNPq pela concessão da bolsa durante o período de mestrado.

Ao meu professor e orientador Dr. Robson Bonomo e co-orientador Dr. Fábio Ribeiro Pires pelos ensinamentos, amizade e oportunidades.

Aos professores e funcionários do CEUNES pelo apoio e dedicação.

Ao técnico do Laboratório de Física do Solo Helder Ivo Pandolfi Marques, por todo auxílio para realização das análises.

Ao produtor José Bonomo e seus funcionários por disponibilizar a área para o experimento bem como auxiliar em todo processo de coleta dos dados.

E a quem mais, de alguma forma, contribui para realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

Joabe Martins de Souza, nascido em São Gabriel da Palha, estado do Espírito Santo, em 27 de maio de 1987, filho de Joel Batista de Souza e Maria Rosa Martins de Souza.

Cursou ensino fundamental na Escola Claudina Barbosa, em Nova Venécia, parte do ensino médio no Colégio Estadual e parte no Centro Educacional Evolução também em Nova Venécia.

Em agosto de 2006 ingressou no Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, no curso de Agronomia, onde obteve o título de Engenheiro Agrônomo em janeiro de 2011.

Ingressou em março de 2011, no Curso de Mestrado em Agricultura Tropical - PPGAT do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), no Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), concluindo em fevereiro de 2013.

"Para que todos vejam, e saibam, e considerem e juntamente entendam que a mão do Senhor fez isto (...)"

**Isaías 41:2**



## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| RESUMO .....   | VIII |
| ABSTRACT .....   | X    |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 1    |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA .....   | 3    |
| 2.1 Preparo do Solo .....  | 3    |
| 2.2. Solos de Tabuleiros Costeiros.....  | 5    |
| 2.3. Atributos Físicos do Solo.....  | 6    |
| 2.3.1 Textura do Solo .....  | 6    |
| 2.3.2 Massa Específica e Porosidade do Solo .....  | 7    |
| 2.3.3 Resistência do solo à penetração .....   | 9    |
| 2.4. Atributos Físico-Hídricos do solo.....  | 11   |
| 2.4.1 Curva de Retenção de Água no Solo .....  | 11   |
| 2.4.2 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado .....  | 13   |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS.....   | 16   |
| 3.1 Localização e descrição da área experimental.....  | 16   |
| 3.2 Análise Textural.....  | 18   |
| 3.3 Curva de retenção, massa específica do solo, índice S, água disponível e água prontamente disponível ..... | 19   |
| 3.4 Porosidade total, Macroporosidade e Microporosidade .....  | 21   |
| 3.5 Condutividade hidráulica do solo saturado.....   | 21   |
| 3.6 Resistência do solo à penetração .....   | 22   |
| 4. RESULTADOS .....  | 24   |
| 4.1 Massa específica e porosidade do solo .....  | 24   |
| 4.2 Resistência do solo à penetração (RP) .....  | 29   |
| 4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) .....   | 34   |

|  |    |
|--|----|
| 4.4 Curva de retenção, disponibilidade de água no solo e água prontamente disponível ..... | 38 |
| 4.5 Índice S .....   | 44 |
| 5. CONCLUSÕES .....  | 49 |
| 6. REFERÊNCIAS.....  | 50 |

## RESUMO

SOUZA, Joabe Martins de; M. Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; Fevereiro de 2013; **Atributos Físico-Hídricos do Solo em Lavoura de Café Conilon Submetida à Subsolação**; Orientador: Robson Bonomo; Co-orientador: Fábio Ribeiro Pires.

O preparo adequado do solo promove modificações nos atributos físicos, principalmente na estrutura, podendo modificar a capacidade de armazenamento de água, fundamental na determinação das necessidades de irrigação para as culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do preparo do solo para plantio de café Conilon (*Coffea canephora* Pierre) submetido à subsolação, nas propriedades físicas e hídricas do solo. A área experimental foi composta por três talhões cultivados com cafeeiro a 11, 7 e 3 anos, denominados T11, T7 e T3, respectivamente, submetidos à subsolação nas linhas de plantio. Para as avaliações físico-hídricas do solo, foram retiradas amostras deformadas e indeformadas, na linha (P1) e entrelinha (P2) da cultura e a quatro profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 m. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições. As propriedades do solo avaliadas foram massa específica do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, além da curva de retenção de água, condutividade hidráulica do solo saturado, resistência do solo à penetração e o índice S. A massa específica do solo, porosidade total e macroporosidade apresentaram diferenças significativas entre os pontos de amostragem para as camadas superiores do solo, com maior porosidade total e macroporos para o ponto P1 e uma maior massa específica do solo para o ponto P2, não diferindo das demais camadas. A porosidade total apresentou um comportamento inverso ao da massa específica do solo e houve aumento da microporosidade e diminuição da macroporosidade em profundidade. Entre os talhões com diferentes idades, as propriedades físico-hídricas do solo não apresentaram diferenças significativas, mostrando que as melhorias da subsolação são persistentes ao longo dos anos nessa condição de cultivo. A resistência à penetração diferiu entre os pontos amostrais, ocorrendo um aumento com a profundidade, não diferindo, todavia, entre os talhões. Foi observada uma correlação positiva entre resistência à penetração e a massa específica e microporosidade, e

negativa com a macroporosidade. A condutividade hidráulica do solo saturado apresentou diferença entre os pontos amostrais, nas camadas de 0,00-0,40 m, não apresentando diferença entre os talhões. Ocorreu uma correlação negativa entre a resistência à penetração e a microporosidade e correlação positiva com a macroporosidade. O coeficiente de determinação de ajuste das curvas de retenção de água no solo foi superior a 98% e os parâmetros de ajuste aumentaram com a profundidade. A disponibilidade de água apresentou-se, em geral, maior na linha do cafeeiro, até 0,60 m, mostrando o benefício da subsolagem na retenção de água. O índice S foi maior na linha de plantio, apresentando alta correlação com a porosidade e a massa específica do solo. A subsolagem alterou as propriedades físico-hídricas do solo, proporcionando um equilíbrio entre a macro e a microporosidade, aumento da disponibilidade de água e condutividade hidráulica do solo saturado, e ainda maior retenção de água em baixas tensões. O índice S mostrou-se como uma boa ferramenta para avaliar a qualidade do solo nessas condições.

**Palavras-chave:** *Coffea canephora*, Preparo do solo, Tabuleiros Costeiros, Curva de Retenção, Condutividade hidráulica.,

## ABSTRACT

SOUZA, Joabe Martins, M. Sc.; Federal University of Espírito Santo; February 2013; **Attributes Physical-Hydric in Soil Tillage Conilon Café Subjected to subsoiling**; Advisor: Robson Bonomo, Co-advisor: Fábio Ribeiro Pires.

The proper preparation of the soil promotes changes in physical attributes, especially the structure and can modify the storage capacity of water, crucial in determining irrigation needs for crops. The aim of this study was to evaluate the effects of soil preparation for planting Conilon coffee (*Coffea canephora* Pierre) submitted to subsoiling, physical properties and soil water. The experimental area consisted of three plots cultivated with coffee at 11, 7 and 3 years old, called T11, T7 and T3, respectively, submitted to subsoiling in the rows. For the evaluations hydro-physical soil samples were collected and undisturbed, in line (P1) and leading (P2) culture and four depths 0.00 to 0.20, 0.20-0.40, 0.40 -0.60, from 0.60 to 0.80 m. The experimental design was completely randomized design with three replications. The soil properties were evaluated soil bulk density, total porosity, macroporosity and microporosity, besides the water retention curve, saturated hydraulic conductivity, resistance to penetration and index S. The soil density, total porosity and macroporosity showed significant differences between the sampling points for the upper soil layers with higher porosity and macropore to the point P1 and a higher density of the soil to the point P2, did not differ from other layers. The total porosity showed an inverse behavior to the specific weight of the soil and increased the microporosity and macroporosity decrease in depth. Among the areas with different ages, physical and hydraulic properties of the soil showed no significant differences, showing that improvements of subsoiling are persistent over the years in this culture condition. The penetration resistance differed between sampling points, occurring with increasing depth, no difference, however, between the plots. We observed a positive correlation between penetration resistance and bulk density and microporosity, macroporosity and negative. The saturated hydraulic conductivity differ between sampling points in the layers of 0.00-0.40 m, with no significant difference between the plots. There was a negative correlation between penetration resistance and positive correlation with microporosity and macroporosity. The determination coefficient of adjustment curves water retention in the soil was greater than 98% and tuning parameters increased with depth. Water availability presented in general

higher in the coffee line, until 0.60m, showing the benefit of subsoiling water retention. The S was higher in the rows, showing high correlation with the porosity and density of the soil. Subsoiling changed the physical and hydraulic properties of the soil, providing a balance between macro and micro, increased water availability and soil saturated hydraulic conductivity, and greater water retention at low voltages. The S proved to be a good tool to assess soil quality under these conditions.

**Keywords:** Coffea canephora, Soil Preparation, Coastal Tablelands, Retention Curve, Hydraulic Conductivity, Soil Porosity.

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura como importante atividade do setor agropecuário, desempenha função de vital relevância para o desenvolvimento social e econômico do Brasil, garantindo a geração de postos de trabalho e renda dos produtores, contribuindo de forma expressiva para a formação da receita brasileira. Sendo notório o destaque do sistema agroindustrial do café como exemplo, em termos de uso de mão-de-obra e fixação do homem no campo, geração de empregos nos setores antes e após a produção primária.

Na agricultura, o estado do Espírito Santo se destaca principalmente com relação ao café Conilon, ocupando a posição de maior produtor nacional, e tem nesse produto um dos principais componentes do agronegócio capixaba. O Conilon tem grande importância econômica e social, particularmente no norte do estado, onde se concentra a maior produção estadual.

As práticas realizadas antes da implantação de uma lavoura cafeeira têm papel fundamental no desenvolvimento da cultura. Neste contexto, o solo é o principal suporte da produção agrícola. A ação do homem por meio das práticas agrícolas interfere neste sistema, alterando-o, afetando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O solo é um dos componentes do ambiente de produção mais importantes, devendo ser manejado de forma a preservar, ou mesmo, melhorar as suas características físicas, químicas e biológicas.

O preparo adequado do solo promove modificações nos atributos físicos, principalmente na estrutura, que podem favorecer o crescimento das culturas, em

curto prazo. Entretanto, o cultivo intensivo, durante vários anos, pode degradar os solos, alterando a retenção de água, reduzindo a produtividade e aumentando os custos de produção.

O conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo é importante, pois elas influenciam diretamente no armazenamento de água disponível às plantas (MICHELON et al., 2010). O conhecimento do potencial da água no solo é de fundamental importância na determinação das necessidades de irrigação para as culturas, proporcionando um manejo correto da água nos sistemas de irrigação. A curva de retenção de água do solo, que representa a relação entre o potencial mátrico e a umidade do solo, também pode ser usada como um indicativo dos efeitos do manejo na distribuição de poros por tamanho, das propriedades hidráulicas, bem como do armazenamento de água no solo, já que essa curva é sensivelmente alterada pela estrutura do solo (HILLEL, 1970). Devido à constante alteração no sistema poroso do solo proporcionado pelo manejo de lavouras cafeeiras é de se esperar uma alteração da retenção de água do solo nestas condições.

Para o manejo de irrigação a curva de retenção é uma ferramenta que possibilita conhecer a capacidade que um solo tem em reter água. A curva pode ser alterada principalmente pelo preparo e manejo do solo, daí a importância de estudar os seus efeitos, para que se possa adotar um manejo adequado e, com isso, melhorar o uso dos recursos hídricos, notadamente, na região norte do estado do Espírito Santo, visando à produção de alta rentabilidade e também sustentável.

Neste sentido, esse trabalho teve como objetivo a avaliação dos efeitos da subsolagem do solo no sulco de plantio, do café Conilon (*Coffea canephora* Pierre) nas propriedades físico-hídricas do solo, e, em especial, na sua capacidade de retenção de água, avaliando também a duração do efeito do tempo após o plantio.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Preparo do Solo

Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutrientes e calor às sementes e raízes das plantas, de maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular para maximizar a produção das culturas.

Segundo Klar (1984), a definição de solo corresponde a um sistema poroso constituído por partículas sólidas e volume de vazios, que podem ser ocupados pelo ar e pela água, assim exercendo a função de armazenador de nutrientes e água para o desenvolvimento de cultivos.

As práticas realizadas no solo antes da implantação de qualquer cultura tem um significado muito especial na agricultura, prática essas que podem promover melhores condições para o desenvolvimento das culturas.

O preparo do solo está relacionado com a sustentabilidade da agricultura, pois influencia a maioria das propriedades físicas do solo, afetando nos processos biológicos e condicionando o estabelecimento, o desenvolvimento e a produção das plantas cultivadas (SILVA et al., 2011).

Segundo Chaves (2002) e Cortez et al. (2011) o preparo do solo consiste em práticas que visam dar melhores condições de desenvolvimento ao sistema radicular das plantas, proporcionar boas condições físicas do mesmo para que as plantas

possam se desenvolver adequadamente, possibilitando melhor infiltração e armazenamento de água, já que os atributos físicos do solo apresentam influência direta no desenvolvimento radicular (SILVA et al., 2006), e são afetados pelo seu manejo e pelas práticas culturais, com conseqüente alteração da dinâmica e retenção de água nos poros (KLEIN et al., 2010).

Prando et al. (2010) relatam que nos solos com restrições físicas e, ou, físico-hídricas ao crescimento de raízes, o aumento do potencial de armazenamento de água por meio de melhorias na infiltração pode ser uma estratégia viável para aumentar a produtividade das culturas.

De acordo com Kiehl (1979) e Brady (1989), o solo é a principal fonte de água para as plantas, recebendo-a principalmente por meio das precipitações naturais ou por intermédio de irrigações feitas pelo homem. Sendo assim, afirmam que a produção agrícola é proporcional à água do solo disponível às culturas, uma vez que as plantas dela necessitam para elaborar os carboidratos, para manter a hidratação do protoplasma e ainda utilizando-a como meio de transporte de nutrientes e elementos minerais.

Na cafeicultura, como também se observa para as culturas em geral, o preparo do solo visa melhorar as condições de desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro (LANI et al., 2007), pois a distribuição, a arquitetura e a profundidade das raízes podem ser afetadas por diversos fatores, como, a textura, estrutura, massa específica do solo entre outros (RENA & DA MATTA, 2002).

As práticas indicadas para implantação da lavoura cafeeira e outras culturas são a aração, a gradagem e a subsolagem (LANI et al., 2007), sendo que o preparo do sulco de plantio constitui etapa importante desde sistema (SERAFIM et al., 2011).

A subsolagem é uma prática realizada com o objetivo de desagregar camadas compactadas do solo, a fim de facilitar a penetração das raízes e da água para maiores profundidades. Nessa prática agrícola as camadas adensadas do solo são removidas ou desagregadas utilizando-se equipamentos denominados subsoladores. Estes equipamentos possuem hastes que penetram no solo, sendo tracionados por tratores (LANI et al., 2007).

O uso do solo, manejo, nível e o tempo de utilização promovem alterações nas suas propriedades (WENDLING et al., 2005). O cultivo do solo acarreta em modificações nos atributos físicos, dependendo da intensidade de preparo e manejo do solo (VENDRUSCOLO et al., 2011; BOTTEGA et al., 2011). O preparo do solo se

torna então uma prática de grande importância na agricultura, devendo ser manejada de forma correta, preservando o solo, que é um componente do meio de produção fundamental da agricultura.

## **2.2. Solos de Tabuleiros Costeiros**

Os solos dos Tabuleiros Costeiros encontram-se distribuídos por quase toda faixa costeira do Brasil, normalmente são profundos e ocorre associados a relevo plano a suave ondulado, favorecendo a exploração agrícola (VIEIRA et al., 2012).

No Espírito Santo os solos conhecidos como Tabuleiros Costeiros ocorrem predominantemente no norte e noroeste do estado e ocupa uma área aproximadamente de 29 % da superfície do estado (IJSN, 2012). Segundo Zuffo (2012), essas áreas estão localizadas próxima a regiões consumidoras, sendo esses solos cultivados com pastagens, eucalipto, cana-de-açúcar, cafeeiro e fruticultura.

Segundo Moreau et al. (2006), no Brasil, Argissolos e Latossolos Amarelos dos Tabuleiros Costeiros da região litorânea apresentam horizontes endurecidos (horizonte BA e parte do Bt ou do Bw), quando secos, além de horizonte coeso, duas outras feições morfológicas são encontradas, fragipã e duripã, sendo estes mais frequentes nas áreas deprimidas da paisagem.

Os horizontes coesos são definidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006) como horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração da faca com consistência seca muito dura a extremamente dura, passando a friável ou firme quando úmido.

Segundo Lima Neto et al. (2010) sabe-se que a natureza dos horizontes coesos é pedogenética, apesar dessa estar cercada de dúvidas. Essa gênese dos horizontes coesos pode estar associada a diferentes processos, tais como: argiluviação; presença de argila dispersa nos microporos e adensamento pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem (CINTRA et al., 1997), cimentação fraca e temporária promovida por compostos amorfos envolvendo material sílico aluminoso (ARAÚJO FILHO et al., 2001).

Embora os solos sejam considerados profundos, horizontes coesos, com estrutura maciça e consistência dura a extremamente dura quando secos, reduzem

a profundidade efetiva, prejudicando a dinâmica da água no perfil e, principalmente, o aprofundamento do sistema radicular das culturas (SOUZA et al., 2008).

Segundo Coelho et al. (2005) a densidade média da camada coesa situa-se na faixa de  $1,5$  a  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ , já para horizontes superficiais, em condições naturais, varia na faixa  $1,2$  a  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ .

As práticas que visam diminuir a restrição à drenagem e ao desenvolvimento radicular no horizonte coeso se tornam importantes antes da implantação das culturas nessa região, principalmente de culturas perenes, sendo que as restrições impostas por esse horizonte coeso podem ser reduzidas através de práticas realizadas na implantação das culturas.

## **2.3. Atributos Físicos do Solo**

### **2.3.1 Textura do Solo**

A textura do solo representa a distribuição quantitativa das partículas minerais menores que  $2 \text{ mm}$ . De acordo com a classificação adotada no Brasil, proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), as três frações granulométricas do solo são argila, silte e areia. A fração argila é identificada como o conjunto de partículas com diâmetro equivalente menor que  $0,002 \text{ mm}$ ; na fração silte, são contabilizadas as partículas com diâmetro equivalente entre  $0,002$  e  $0,05 \text{ mm}$ ; e a fração areia é composta por partículas com diâmetro equivalente entre  $0,05$  e  $2,0 \text{ mm}$  (CORÁ et al., 2009).

O conhecimento sobre a distribuição granulométrica das partículas sólidas do solo é essencial para várias aplicações, como na análise da qualidade, estudo sobre compactação e movimentação da água no solo, da disponibilidade de água, da aeração, da condutividade do solo ao ar, à água e ao calor (PREVEDELLO, 1996; SILVA et al., 2011).

A textura do solo segundo Scheinost et al. (1997), é o principal fator entre os vários que afetam a retenção de água no solo, pois determina a área de contato

entre a água e as partículas sólidas, determinando assim a acomodação das partículas e a distribuição de poros. Klein et al. (2010) também relatam que os principais fatores que exercem influência na retenção e disponibilidade de água às plantas são a textura e a estrutura do solo.

### **2.3.2 Massa Específica e Porosidade do Solo**

A massa específica do solo expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume do solo. No volume do solo é incluído o volume de sólidos e o de poros. Assim, sempre que houver modificação do espaço poroso haverá alteração da massa específica do solo. Dessa forma, a massa específica do solo fornece indicações a respeito do estado de conservação de um solo, sobretudo em sua influência em propriedades como infiltração e retenção de água no solo, desenvolvimento de raízes, trocas gasosas e suscetibilidade do solo aos processos erosivos, sendo largamente utilizada na avaliação da compactação e ou adensamento dos solos (TORMENA et al., 1998; KLEIN, 2008; GUARIZ et al., 2009).

Por outro lado também, o material constituinte do solo, assim como os sistemas de uso e manejo e tipo de cobertura vegetal tem muita influência nos seus valores. Logo, pode-se ter em solos de mesma textura e material de origem diferentes valores de massa específica no perfil (JORGE et al., 2012), sendo alterada pelo cultivo, pela compressão de máquinas agrícolas, por animais e condições ambientais do meio (ARSHAD et al., 1996).

A produtividade vegetal depende de vários fatores, dentre os quais a massa específica e a porosidade do solo, sendo o manejo do solo uma das fontes mais importantes de variabilidade das propriedades físicas do solo, que por sua vez podem influenciar a produtividade das culturas (VITÓRIA et al., 2012).

Os atributos físicos do solo favoráveis ao crescimento do sistema radicular são necessários para a obtenção e manutenção de elevadas produtividades. Os solos devem possuir suficiente espaço poroso (macro e microporos) para o movimento da água e gases, bem como resistência favorável a penetração e desenvolvimento das raízes (PARENTE & MAIA, 2011), assim a massa específica

do solo e a sua porosidade total são indicativos das condições adequadas para o desenvolvimento e exploração das raízes, indicando se há problemas de compactação (RAMIREZ-LOPEZ et al., 2008).

Isto se dá pois a massa específica e a porosidade do solo são propriedades relacionadas com alterações no volume do solo e, dessa forma, altamente relacionadas com a compactação deste (REICHERT et al., 2007).

Conforme Carvalho et al. (2007) e Beutler et al. (2001), os atributos físicos como a massa específica do solo e a umidade são indicadores da qualidade do solo, entendendo como qualidade do solo a capacidade deste em manter uma produtividade sustentável, pois melhora o ambiente, a planta, o animal e o homem.

Solos arenosos apresentam massas específicas do solo superiores aos encontrados para os solos argilosos, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A massa específica dos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>, enquanto os solos argilosos esta variação pode ir de 0,9 a 1,6 g cm<sup>-3</sup> e de 0,2 a 0,6 g cm<sup>-3</sup> para solos orgânicos (PREVEDELLO, 1996).

Segundo Costa et al. (2003), a massa específica do solo tende a aumentar com a profundidade o que se deve a fatores tais como: teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, menor penetração de raízes, maior compactação ocasionada pelo peso das camadas subjacentes, diminuição da porosidade total devido à eluviação de argila, dentre outros.

A massa específica do solo apresenta uma relação inversa com a porosidade, assim, considerando-se um mesmo solo, um aumento na massa específica reflete a diminuição do espaço poroso do solo. Por sua vez, porosidade total do solo representa o volume total de poros, todavia, não fornece informações sobre a distribuição dessa porosidade (HILLEL, 1980).

O armazenamento, a disponibilidade e o transporte da solução do solo e do ar não só dependem da porosidade total, mas também de como o espaço poroso total é distribuído por tamanho, ou seja, a quantidade de macro e microporos (PREVEDELLO, 1996). A distribuição dos poros na matriz do solo desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, determinando a evolução espacial e temporal dos processos que envolvem o movimento da água no solo. Assim sendo, a distribuição dos poros por seus tamanhos condiciona o comportamento físico- hídrico do solo, influenciando a potencialidade agrícola dos solos (RIBEIRO et al., 2007).

A porosidade do solo pode ser classificada em macroporosidade (poros maiores), preenchidos pelo ar do solo e microporosidade (poros capilares), responsáveis pela retenção e armazenamento de água (SILVA et al., 2012). Segundo Kiehl (1979), os macroporos são poros que têm diâmetro maior do que 0,06 mm e, os microporos os poros menores do que 0,06 mm, já Richards (1965) e USDA (1972) classificam em macroporos os poros com diâmetro maior do que 0,05 mm e esvaziados à tensão de 6 kPa e microporos os com diâmetro menor do que 0,05 mm.

Outras classificações mais detalhadas subdividem os poros em até oito classes, adotando classificações como criptoporos para poros com diâmetro inferior a 0,0002 mm (KLEIN & LIBARDI, 2002). Os microporos são definidos também como poros de armazenamento de água às plantas, enquanto os criptoporos são aqueles poros nos quais a água pode permanecer retida com energia muito alta, sendo, portanto, indisponível às plantas. É a água que o solo retém quando o seu potencial mátrico se encontra abaixo do ponto de murcha permanente ( $< -1500$  kPa) (KLEIN, 1998).

Durante o processo de compactação a estrutura do solo é modificada, sendo que os macro-agregados são destruídos (TAVARES FILHO et al., 1999). Assim, ocorre uma redução do tamanho de poros e, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente pelos que retêm água (REICHERT et al., 2007).

Os solos com camadas compactadas apresentam redução da porosidade total e da macroporosidade e aumento da microporosidade e da massa específica do solo (KLEIN & LIBARDI, 2002). Como consequência, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (REICHERT et al., 2007), ao mesmo tempo em que compromete o transporte de ar e água e o desenvolvimento radicular (TORMENA et al., 1998; CAVENAGE et al., 1999).

### **2.3.3 Resistência do solo à penetração**

Dentre as propriedades físicas afetadas pela compactação, a resistência à penetração (RP) é uma das mais estudadas (BEUTLER et al., 2007). A camada

compactada pode ser identificada mediante a avaliação de alguns atributos físicos, sendo que um dos atributos mais utilizados para expressar o grau de compactação de um solo tem sido a resistência mecânica à penetração das raízes, que pode ser quantificada com o uso de penetrômetros (TORRES et al., 2012).

A compactação trata da tensão aplicada sobre o solo e mudanças resultantes em termos de aumento da massa específica do solo, decréscimo no volume de macroporos, infiltração e movimento interno de água mais lento e maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes (LOPES et al., 2011).

Os principais fatores externos que interferem na compactação do solo são a carga aplicada ao solo por meio da utilização de maquinários (CAVALIERI et al., 2009), pisoteio animal, revolvimento do solo por equipamentos de preparo do solo como grades, arados e escarificadores (COSTA et al., 2009). Entre os fatores internos, o teor de água (LIMA et al., 2007) e principalmente a fração argila no solo (TAVARES FILHO & RIBON, 2008) são os que mais interferem na intensidade da compactação no solo.

A RP é dependente da textura, da massa específica e, sobretudo, do teor de água do solo (OLIVEIRA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2008; VALICHESKI et al., 2012), exigindo cuidado na sua utilização e interpretação (SILVA et al., 2009).

Várias pesquisas realizadas no país apontam para alterações consideráveis nas propriedades físicas do solo, causadas pelo tráfego intenso de máquinas e implementos de preparo do solo. Tais alterações indicam não apenas decréscimo na porosidade do solo, mas também aumento significativo na massa específica do solo, ocasionando um impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (FREDDI et al., 2007; BERGAMIN et al., 2010; RIBEIRO et al., 2010).

Segundo Tavares Filho et al. (2012), a resistência mecânica do solo é uma importante propriedade que afeta o crescimento e o alongamento das raízes e no movimento da água no solo. Valores de RP igual a 2 MPa têm sido frequentemente utilizados como crítico (TAYLOR et al., 1966) para o crescimento das plantas (RICHART et al., 2005; REICHERT et al., 2007).

Richartet et al. (2005) sugerem algumas práticas com a finalidade de se prevenir, e, ou aliviar a compactação do solo, sendo uma delas a descompactação com o auxílio de subsoladores e escarificadores. A adoção dessa e de outras técnicas poderão minimizar os efeitos da compactação do solo, melhorando assim o



ambiente para desenvolvimento do sistema radicular das culturas e possibilitando a sustentabilidade da agricultura.

## **2.4. Atributos Físico-Hídricos do solo**

### **2.4.1 Curva de Retenção de Água no Solo**

Dentro dos vários atributos físico-hídricos dos solos relacionados ao armazenamento de água no solo e o desenvolvimento das plantas está à curva de retenção de água no solo (CRA). A curva de retenção de água no solo expressa a relação entre o potencial mátrico e a umidade do solo (NASCIMENTO et al., 2010), sendo uma característica específica de cada solo (BEUTLER et al., 2002).

A curva de retenção de água é uma das ferramentas para vários estudos como o balanço de água no solo, a disponibilidade de água às plantas, a dinâmica da água e solutos no solo, a infiltração e o manejo de irrigação. Esta ferramenta pode fornecer tanto o momento quanto a quantidade de água a aplicar para um manejo correto e adequado de irrigação. A partir dela, pode-se obter, também, os valores de umidade correspondentes à capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ao ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), sendo que a diferença de umidade entre  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  é definida como a capacidade de água disponível (CAD) de um solo a uma dada profundidade (BARRETO et al., 2011).

A retenção de água é explicada por dois processos: pela capilaridade e pela adsorção, que estão relacionadas com as forças mátricas ( $\Psi_m$ ), em que o solo retém água com forças cujas intensidades aumentam conforme o seu conteúdo de água diminui, dando origem ao termo potencial mátrico da água no solo (LIBARDI, 2010).

O conteúdo de água retido em determinado  $\Psi_m$  decorre da estrutura, da distribuição dos poros, da massa específica do solo nos quais fenômenos capilares são de maior importância; quando os fenômenos de adsorção dominam, esta é dependente da textura e da superfície específica das partículas minerais da fração argila (HILLEL, 1982; BEUTLER et al., 2002; REATTO et al., 2007; AJAYI et al., 2009).

A determinação da curva de retenção pode ser feita com diferentes metodologias, como o método da centrífuga (SILVA & AZEVEDO, 2002), e o da mesa de tensão ou câmaras de pressão (RICHARDS, 1965), que determinam potenciais até 1500 kPa, utilizando amostras indeformadas e deformadas de solo (EMBRAPA, 1997).

Segundo Dexter (2004), o modelo de ajuste proposto por Van Genuchten (1980), permite relacionar com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica, por isso tem sido adotado universalmente. Esse modelo matemático é caracterizado por apresentar duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo correspondentes à saturação ( $\theta_{sat}$ ) e ao conteúdo residual ( $\theta_{res}$ ), e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (" $\alpha$ ", " $n$ " e " $m$ "), obtidos pelo método dos quadrados mínimos, utilizando recursos computacionais (VAN GENUCHTEN, 1980; DOURADO NETO et al., 2000; CARDUCCI et al., 2011). No ajuste da curva de retenção, é previsível que, quanto maior o número de pontos, mais representativa será a curva de retenção (SILVA et al., 2006).

Segundo Machado et al. (2008), alguns estudos mostram que a curva de retenção de água permite encontrar relações de dependência entre os coeficientes das equações matemáticas que descrevem diversas propriedades do solo. Como os diferentes sistemas de uso e manejo do solo podem promover modificações na sua estrutura e no seu comportamento físico-hídrico, a curva de retenção pode ser útil na avaliação da qualidade do solo e nortear práticas sustentáveis de produção agrícola, mediante esta inter-relação.

Um avanço na quantificação da qualidade estrutural do solo, a partir da curva de retenção de água no solo (CRA) foi proposto por DEXTER (2004), introduzindo o índice S (S de "slope" = declividade), o qual é baseado no ponto de inflexão da CRA, em que o principal interesse está na inclinação da CRA neste ponto. Tanto a posição do ponto de inflexão quanto o coeficiente angular da CRA no ponto de inflexão são importantes. O ponto de inflexão da CRA é o ponto em que a segunda derivada da curva de retenção é nula e a primeira derivada muda de negativo (convexidade) para positivo (concavidade) (SILVA et al., 2010).

Atualmente o índice S proposto por Dexter (2004) vem sendo aceito como parâmetro indicador da qualidade estrutural de solos por representar a distribuição

do tamanho de poros de maior frequência, o que torna possível a comparação direta dos efeitos de diferentes práticas de manejo em diferentes solos (SILVA et al., 2012).

A porosidade microestrutural (poros estruturais compreendendo microfendas, fendas, bioporos e macroestruturas produzidas pelo preparo do solo) é a principal responsáveis pela maior declividade  $S$  da curva de retenção de água no solo no ponto de inflexão, mostrando que o índice  $S$  governa os principais atributos físicos do solo. Uma baixa qualidade física do solo está ligada ao solo que apresenta somente porosidade textural (ocorre entre as partículas dos minerais primários).

Foi proposto por Dexter (2004), valores para o índice  $S$  para classificar a qualidade física do solo, em que valores de  $S \geq 0,050$  o solo apresenta qualidade muito boa,  $0,050 > S \geq 0,035$ , boa qualidade,  $0,035 > S \geq 0,020$ , pobre, e  $0,020 > S$  muito pobre.

#### **2.4.2 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado**

Dentre as variáveis que influenciam o fluxo de a água no solo, a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) se destaca. Este atributo físico-hídrico representa a facilidade com que o solo transmite água. O valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo se encontra saturado, e é denominado de condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990). A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) é uma das propriedades físico-hídricas do solo que assume relevância por fornecer informações imprescindíveis da capacidade de transporte de água, solutos em praticamente todos os mecanismos de fluxos (TREVISAN et al., 2009).

Os processos de infiltração de água no solo, perdas de fertilizantes e de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação são geralmente relacionados ao fluxo de água, o qual influencia todo o processo de utilização dos recursos solo e água (MESQUITA & MORAES, 2004).

A infiltração de água no solo é proporcional à área da seção e à diferença de potencial total da água entre pontos considerados, podendo ser a superfície do solo e um ponto qualquer abaixo, e inversamente proporcional à distância entre estes dois pontos. A condutividade hidráulica se apresenta como o coeficiente de

proporcionalidade entre a intensidade de fluxo e as grandezas citadas e expressa a facilidade com que a água se move no solo. Esta relação é descrita pela Lei de Darcy que, em 1856, escreveu uma equação que permite conhecer a condutividade hidráulica (LIBARDI, 2010).

A condutividade hidráulica do solo saturado sofre influência de atributos do solo tais como: estrutura, textura, homogeneidade, massa específica do solo, massa específica das partículas, porosidade total e macro e micro porosidade (TREVISAN et al., 2009), manejo, a composição granulométrica e o teor de matéria orgânica (SILVA et al., 2012).

Segundo Mesquita & Moraes (2004) a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais adotadas alterando a estrutura do solo influenciam diretamente a  $K_{sat}$ , influenciam mais até do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade de  $K_{sat}$  em sítios próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

Um dos métodos empregados para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado é o permeâmetro de Guelph, sendo um permeâmetro de carga constante (SCHERPINSKI et al., 2010). Segundo Silva et al. (2012), nos últimos anos diversos autores vêm utilizando o permeâmetro de Guelph. Este instrumento é composto de uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante da água. O reservatório de água é formado por um tubo acrílico com régua graduada e um tripé, que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares. O permeâmetro de Guelph, segundo Reynolds et al. (1983), é utilizado para a medição em campo, na ausência do lençol freático, da zona da condutividade hidráulica do solo saturado e do potencial de fluxo matricial, até uma profundidade de 2 m (SCHERPINSKI et al., 2010).

Outro método utilizado é o de laboratório, utilizando amostras indeformadas, sendo que o seu limitante é a alteração que ocorre no solo devido à retirada da amostra que faz com que ocorra uma variação da  $K_{sat}$  entre os métodos de campo (permeâmetro de Guelph) e de laboratório.

A variação entre medidas de laboratório e campo também pode ser devida às diferenças inerentes de cada método. Exemplificando, o permeâmetro de Guelph mede a componente horizontal e vertical de  $K_{sat}$  sob condições anisotrópicas, enquanto o método de laboratório determina os valores verticais de  $K_{sat}$ . Portanto,

comparar valores obtidos de Ksat por diferentes métodos não leva a conclusões objetivas (MESQUITA & MORAES, 2004).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e descrição da área experimental

O presente trabalho foi desenvolvido em área com cultivo de café Conilon (*Coffea canephora* Pierre), na fazenda do Senhor José Bonomo, localizada na rodovia São Mateus – Nova Venécia-ES, latitude 18°43'58,57" S e 40° 5' 52,97"O, com lavouras já implantadas e manejadas.

O clima do município de São Mateus é classificado segundo Köppen em Aw, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão. A precipitação média anual de 1.200 mm concentrada entre os meses de novembro e janeiro. A temperatura média anual é de 23°C, e as médias máximas e mínimas são de 29°C e 18°C, respectivamente (NÓBREGA et al., 2008).

O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo coeso, textura média em A e argilosa em B segundo metodologia da Embrapa (2006).

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, sendo um fatorial 3 x 4 x 2, com três repetições, sendo: 3 talhões com idades diferentes T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos), quatro camadas amostradas (0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 m) e dois pontos P1 (linha do cafeeiro) e P2 (entrelinha do cafeeiro).

Os três talhões foram submetidos à subsolagem na linha do cafeeiro, na época de plantio. Para subsolagem do terreno foi utilizado o trator 1 com subsolador

(T11), trator 2 com ripper (T7) e o trator 3 com ripper (T3), onde no Quadro 1 são apresentadas as especificações técnicas.

QUADRO 1. Especificação técnicas das máquinas e implementos utilizados

| Máquinas e Implementos | Especificação técnica             |
|------------------------|-----------------------------------|
| Trator 1               | Valmet, traçado, 140 cv, pneu,    |
| Trator 2               | Carterpillar D6, esteira          |
| Trator 3               | John Deere, traçado, 180 cv, pneu |
| Subsolador             | 4 hastes de 0,50 m                |
| Ripper                 | De 0,80 m                         |

O manejo mecanizado da área ocorre no plantio e a cada quatro anos, com a realização da poda drástica das plantas de 0,20-0,40 m de altura do solo. Nestas ocasiões ocorreram as práticas mecanizadas com a entrada de um trator de pneu de 65 cv, com triturador e aplicador de calcário. Ao longo do primeiro ano de implantação da lavoura, e no pós-poda, ocorreram também a aplicação de adubo foliar e defensivos, com média de cinco entradas, utilizando um trator Agrale 4200.

As amostras com estrutura preservada (indeformadas), utilizadas para a determinação da massa específica do solo, porosidade do solo e retenção de água, foram coletadas nos pontos e camadas anteriormente citadas. As coletas foram realizadas com o auxílio de um amostrador, utilizando um anel volumétrico com 0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura. Juntamente, retiraram-se amostras com estrutura não preservada (deformadas) para a determinação da textura do solo.

As análises de solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo (CEUNES/UFES).

### 3.2 Análise Textural

A análise textural foi realizada pelo método da pipeta, baseado no princípio da velocidade de queda das partículas, conforme a Lei de Stokes, utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio a  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  (EMBRAPA, 1997). Para a dispersão física, empregou-se a agitação lenta de 50 rpm por 16 h em agitador rotatório tipo Wagner. A fração silte foi obtida por diferença entre duas pipetagens, sendo na primeira recolhido silte + argila e, na segunda, apenas argila. A separação da fração areia foi feita por lavagem e peneiramento em peneira com malha de 0,053 mm. Na Tabela 1 estão apresentados os resultados das análises textural.

TABELA 1. Valores médios de areia grossa, fina, silte e argila em dois pontos, quatro profundidades e três talhões

| Talhão             | Ponto | Profundidade (m) | Areia  | Areia  | Argila | Silte |
|--------------------|-------|------------------|--------|--------|--------|-------|
|                    |       |                  | Grossa | Fina   |        |       |
| g kg <sup>-1</sup> |       |                  |        |        |        |       |
| T11                | P1    | 0,00-0,20        | 621,88 | 145,34 | 221,05 | 11,74 |
|                    |       | 0,20-0,40        | 381,03 | 192,31 | 419,60 | 7,06  |
|                    |       | 0,40-0,60        | 345,42 | 158,84 | 488,89 | 6,85  |
|                    |       | 0,60-0,80        | 319,82 | 164,56 | 503,91 | 11,71 |
|                    | P2    | 0,00-0,20        | 619,20 | 156,07 | 218,60 | 6,13  |
|                    |       | 0,20-0,40        | 441,53 | 181,18 | 362,09 | 15,20 |
|                    |       | 0,40-0,60        | 309,84 | 152,59 | 518,12 | 19,45 |
|                    |       | 0,60-0,80        | 306,02 | 152,31 | 534,27 | 7,40  |
| T7                 | P1    | 0,00-0,20        | 570,32 | 165,14 | 250,87 | 13,65 |
|                    |       | 0,20-0,40        | 445,27 | 190,65 | 348,75 | 15,33 |
|                    |       | 0,40-0,60        | 361,52 | 177,17 | 448,19 | 13,13 |
|                    |       | 0,60-0,80        | 323,20 | 145,02 | 520,23 | 11,55 |
|                    | P2    | 0,00-0,20        | 577,41 | 165,08 | 244,15 | 13,36 |
|                    |       | 0,20-0,40        | 449,79 | 158,84 | 381,38 | 9,99  |
|                    |       | 0,40-0,60        | 362,76 | 156,85 | 473,91 | 6,48  |
|                    |       | 0,60-0,80        | 352,87 | 140,20 | 501,52 | 5,41  |
| T3                 | P1    | 0,00-0,20        | 547,25 | 178,60 | 259,95 | 14,20 |
|                    |       | 0,20-0,40        | 421,58 | 183,93 | 374,00 | 20,49 |
|                    |       | 0,40-0,60        | 373,10 | 158,45 | 458,71 | 9,74  |
|                    |       | 0,60-0,80        | 307,33 | 140,41 | 536,67 | 15,60 |
|                    | P2    | 0,00-0,20        | 675,03 | 119,04 | 186,06 | 19,87 |
|                    |       | 0,20-0,40        | 514,98 | 179,32 | 292,30 | 13,41 |
|                    |       | 0,40-0,60        | 361,69 | 147,71 | 481,22 | 9,38  |
|                    |       | 0,60-0,80        | 354,26 | 129,47 | 508,37 | 7,90  |



### 3.3 Curva de retenção, massa específica do solo, índice S, água disponível e água prontamente disponível

Para determinação da retenção de água no solo, as amostras indeformadas e a membrana porosa foram colocadas dentro de uma bandeja com água destilada, até a metade da altura do anel cilíndrico, para que ocorresse a saturação do meio (amostra + membrana), cujo tempo demandado foi de em torno de 24 horas. Após a saturação, pesaram-se as amostras para a determinação do conteúdo de água no ponto de saturação (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007).

Em seguida as amostras, foram levadas, sobre a membrana porosa, para o interior da câmara de pressão (Figura 1). Os pontos de tensão aplicados na câmara foram: 6, 10, 30, 50, 100, 300, 500 e 1.500 kPa, a segunda referente a capacidade de campo e a última ao ponto de murcha permanente. A cada tensão aplicada (sempre na ordem crescente), retirou-se a amostra da câmara após cessar a drenagem do excedente de umidade (equilíbrio entre a pressão aplicada e a umidade relacionada). Pesando-se as amostras, e retornando-as para a câmara de pressão, ajustando-se o ponto de tensão seguinte. Ao final de todas as tensões aplicadas, as amostras foram levadas para estufa a 105 °C por 48 horas para a determinação da massa do solo seco, permitindo assim a obtenção das umidades em base gravimétrica correspondentes às tensões aplicadas consideradas iguais aos valores dos potenciais mátricos (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007).

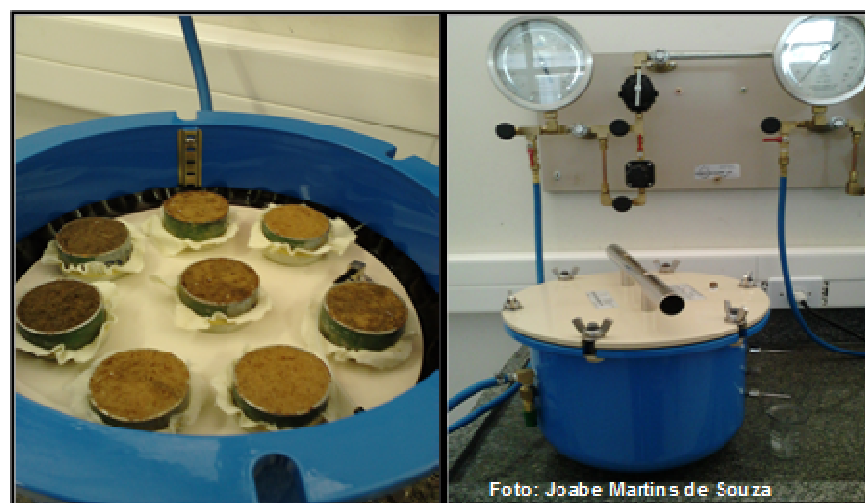


FIGURA 1. Amostras na câmara de Richards.

A curva de retenção de água no solo foi ajustada ao modelo proposto por Van Genuchten (1980), descrito pela Equação 1, que associa os valores de umidade obtidos no equilíbrio com os respectivos potenciais.

O índice S foi calculado a partir dos parâmetros de ajuste da curva, como proposto por Dexter (2004) utilizando a Equação 2.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi_m)^n]^m} \quad (1)$$

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)} \quad (2)$$

em que:

$\theta$  =umidade volumétrica do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );

$\theta_r$ =umidade volumétrica do solo na tensão de 1500 kPa ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );

$\theta_s$ =umidade volumétrica do solo saturado ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );

$\psi$  = Potencial da água no solo (kPa);

$\alpha, m, n$  = parâmetros empíricos da equação, obtidos pelo ajuste do modelo.

A umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e a umidade residual ( $\theta_r$ ), constantes no modelo, foram tratadas como variáveis independentes, sendo assumidas como equivalentes à porosidade total e à umidade em equilíbrio com o potencial de 1500 kPa, respectivamente. O parâmetro  $m$  foi considerado dependente de  $n$ , equivalendo a  $1-1/n$  (MUALEM, 1976). Na obtenção deste ajuste foi utilizado o software SWRC (DOURADO NETO et al., 2001).

A disponibilidade total de água (DTA) foi calculada pela diferença entre o teor de água obtido na capacidade de campo (10 kPa) e o teor de água retido no potencial de 1500 kPa, considerado como o ponto de murcha permanente. A água prontamente disponível (APD) foi calculada pela diferença entre de teor de água retida a 10 kPa e a 100 kPa, conforme definido por Costa et al. (2009).

### 3.4 Porosidade total, Macroporosidade e Microporosidade

A porosidade total ( $P_T$ ) foi determinada a partir da umidade de saturação do solo e a microporosidade ( $P_{Mi}$ ) a partir da quantidade de água retida nas amostras indeformadas de solo submetidas à tensão de 6kPa (0,60 m de H<sub>2</sub>O). A macroporosidade ( $P_{Ma}$ ) foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade ( $P_{Ma} = P_T - P_{Mi}$ ) (EMBRAPA, 1997).

### 3.5 Condutividade hidráulica do solo saturado

As medidas de condutividade hidráulica do solo saturado foram realizadas utilizando-se um permeâmetro de fluxo constante (Permeâmetro de Guelph) (Figura 2), de acordo como os procedimentos descritos no manual de instruções operacionais do próprio permeâmetro (SOIL MOISTURE, 2005).

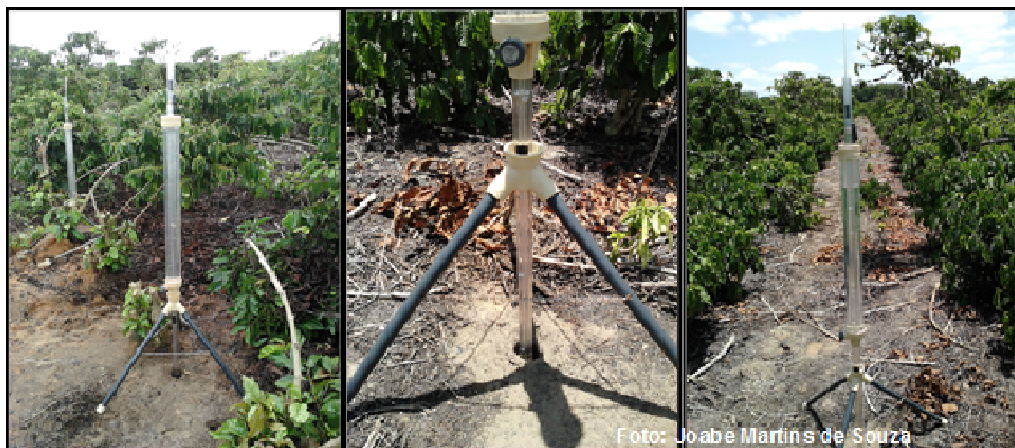


FIGURA 2. Avaliação da condutividade hidráulica na linha e entrelinha com permeâmetro de Guelph.

As medidas das taxas de infiltração foram realizadas em cargas constantes de 0,05 m ( $R_1$ ) e 0,10 m ( $R_2$ ) de água em intervalos de tempos, nos dois pontos e no centro de cada uma das quatro profundidades já apresentadas. Por meio das Equações 3 ou 4, cuja escolha dependeu da opção de reservatório combinado ou interno utilizado, foi possível calcular a condutividade hidráulica do solo saturado.

$$K_{sat} = (0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1) \quad (3)$$

$$K_{sat} = (0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1) \quad (4)$$

em que:

$K_{sat}$  = condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm s}^{-1}$ )

$R_1$  e  $R_2$  = taxas de infiltração de água, determinadas pelo permeâmetro, para as cargas constantes de 0,05 e 0,10 m, respectivamente;

X e Y = constantes fornecidas pelo fabricante do permeâmetro.

No caso do permeâmetro utilizado, as constantes X e Y são respectivamente 35,22 para o reservatório combinado e 2,15 para o interno.

### 3.6 Resistência do solo à penetração

As determinações de resistência do solo à penetração foram realizadas ao acaso nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,70 m, em cada talhão e ponto estudados (linha e entrelinha do cafeeiro), com o auxílio de um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar /Stolf. O penetrômetro de impacto com diâmetro de base de 1 cm foi introduzido perpendicularmente à superfície do solo. De acordo com Stolf (1991), a haste do aparelho penetra no solo através do impacto do êmbolo (4 kg) que cai de uma altura constante, em queda livre, contando-se o número de impactos necessários para que o aparelho penetre por meio da ponta cônica de 30° a uma determinada distância. Os dados de campo foram obtidos em números de impactos  $\text{dm}^{-1}$ , tendo sido transformados em  $\text{kgf cm}^{-2}$  pelo emprego da Equação 5 (SENE et al., 1985). Posteriormente, estes valores foram multiplicados pela constante 0,098 para transformação em unidades MPa, conforme Arshad et al. (1996).

$$R = 5,6 + 6,98 N \quad (5)$$

em que:

R = resistência do solo ( $\text{kgf cm}^{-2}$ );

N = números de impactos ( $\text{dm}^{-1}$ ).

A umidade gravimétrica (EMBRAPA, 1997) das amostras coletadas nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 m foi determinada no momento das determinações da resistência do solo à penetração, para cada talão e pontos estudados.

Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey a 5% de significância para comparação entre médias utilizando-se o programa GENES (CRUZ, 2006). Além disso, para verificar as relações entre algumas variáveis, foi realizada complementarmente a análise correlação linear de Pearson.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Massa específica e porosidade do solo

Analisando o efeito do ponto em relação a cada talhão (Tabela 2), pode-se observar que todas as propriedades físicas do solo não apresentaram diferenças significativas entre os talhões com diferentes idades do preparo inicial, mostrando a uniformidade entre os talhões e a permanência, com o tempo, das mudanças causadas pelo preparo com subsolagem. Comparando os pontos dentro de cada talhão, apenas aquele com 7 anos de idade (T7) apresentou diferença significativa para Me, VTP e Macro. O ponto P1, onde ocorreu a subsolagem, apresentou maiores médias para VTP, Macro e Micro, apesar de não significativo para essas propriedades e uma menor Me, mostrando uma melhoria nas propriedades físicas do solo, com a utilização da subsolagem, favorecendo assim um melhor desenvolvimento para a cultura do cafeeiro, resultados que corroboram com Nacif et al. (2008).

TABELA 2. Massa específica do solo (Me), volume total de poros (VTP), microporosidade (Micro) e macroporosidade (Macro) determinados na linha (P1) e na entrelinha (P2), em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão  | Massa Específica do solo (g cm <sup>3</sup> ) |          |
|---|---|----------|
|   | P1  | P2       |
| T11   | 1,56 Aa                                       | 1,60 Aa  |
| T7  | 1,47 Ab                                       | 1,64 Aa  |
| T3  | 1,59 Aa                                       | 1,68 Aa  |
| Volume Total de Poros (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) |   |          |
| T11   | 41,54 Aa                                      | 40,15 Aa |
| T7  | 45,80 Aa                                      | 40,78 Ab |
| T3  | 44,10 Aa                                      | 41,00 Aa |
| Macroporos (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )            |   |          |
| T11   | 14,65 Aa                                      | 15,67 Aa |
| T7  | 22,86 Aa                                      | 14,88 Ab |
| T3  | 18,86 Aa                                      | 15,74 Aa |
| Microporos (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )            |   |          |
| T11   | 26,88 Aa                                      | 24,48 Aa |
| T7  | 22,93 Aa                                      | 25,89 Aa |
| T3  | 25,23 Aa                                      | 25,26 Aa |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da Massa específica do solo, Volume Total Poros, Macroporosidade e Microporosidade, 4,35%, 6,06%, 26,33% e 14,17%, respectivamente.

O efeito da subsolagem nas profundidades em cada ponto, utilizando a média dos três talhões é apresentado na Tabela 3, observa-se que a massa específica do solo (Me), o volume total de poros (VTP) e a macroporosidade (Macro) apresentaram diferença significativa entre os pontos estudados P1 e P2 nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. Verifica-se maior volume total de poros e macroporos para o ponto P1 e uma maior massa específica do solo para o ponto P2 nessas mesmas camadas, não diferindo estatisticamente para as demais camadas estudadas. O volume total de poros apresentou comportamento inverso à massa específica do solo, observando-se estreita relação entre a estrutura do solo e distribuição de poros, resultado esse que corrobora várias pesquisas (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999; SILVA et al., 2000; IMHOFF et al., 2001; BAVOSO et al., 2010; JORGE et al., 2012). Estes resultados mostram que o preparo do solo com subsolagem promoveu uma melhoria das condições físicas do solo com redução da Ds e aumento do VTP na linha de plantio.

Observa-se um aumento da microporosidade em profundidade, com a diminuição da macroporosidade proporcionada pelo aumento da massa específica do solo, comprovando que, no processo de compactação, ocorre a substituição de macro em microporos (KLEIN & LIBARDI, 2002). Estes resultados corroboram Alves & Suzuki (2004) e Souza et al. (2010), mesmo não apresentando diferenças estatísticas entre os pontos estudados (Tabela 3).

Essas informações são confirmadas também quando se analisa cada talhão e profundidade na Tabela 4, apesar do aumento em profundidade no talhão T7 apresentou um comportamento diferente dos demais, onde apesar de apresentar estatisticamente iguais entre os pontos nas profundidades, o P2 obteve maiores médias de microporos nesse ponto.. As menores massas específicas do solo foram encontradas nas camadas de 0,00-0,40 m principalmente nos T11 e T7, tendo um maior massa específica do solo na camada de 0,40-0,60 m no T11 (Tabela 4 ).



TABELA 3. Massa específica do solo, volume total de poros, microporosidade e macroporosidade, determinados na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, na média de três talhões de produção de café Conilon

| Profundidade (m) | Massa Específica do Solo ( $\text{g cm}^{-3}$ )      |           |
|------------------|--|-----------|
|                  | P1   | P2        |
| 0,00-0,20        | 1,40 Cb  | 1,60 Aa   |
| 0,20-0,40        | 1,49 BCb   | 1,67 Aa   |
| 0,40-0,60        | 1,61 ABa   | 1,62 Aa   |
| 0,60-0,80        | 1,66 Aa  | 1,68 Aa   |
|                  | Volume Total de Poros ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) |           |
| 0,00-0,20        | 46,51 Aa   | 39,84 Ab  |
| 0,20-0,40        | 46,66 Aa   | 39,22 Ab  |
| 0,40-0,60        | 42,43 ABa  | 40,54 Aa  |
| 0,60-0,80        | 39,64 Ba   | 42,98 Aa  |
|                  | Macroporos ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )            |           |
| 0,00-0,20        | 25,36 Aa   | 21,34 Aa  |
| 0,20-0,40        | 23,82 ABa  | 16,17 ABb |
| 0,40-0,60        | 15,73 BCa  | 12,84 ABa |
| 0,60-0,80        | 10,27 Ca   | 11,38 Ba  |
|                  | Microporos ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )            |           |
| 0,00-0,20        | 21,15 Ba   | 18,50 Ca  |
| 0,20-0,40        | 22,84 Aba  | 23,05 BCa |
| 0,40-0,60        | 26,70 ABa  | 27,69 ABa |
| 0,60-0,80        | 29,37 Aa   | 31,60 Aa  |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da Massa específica do solo, Volume Total Poros, Macroporosidade e Microporosidade, 4,35%, 6,06%, 26,33% e 14,17%, respectivamente.

TABELA 4. Massa específica do solo (Me), volume total de poros (VTP), microporosidade (Micro) e macroporosidade (Macro), determinados na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, em três talhões de produção de café Conilon T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão | Profundidade (m) | Atributos Físicos do solo |          |                                       |           |   |           |   |             |  |  |
|--------|------------------|---------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|---|-----------|---|-------------|--|--|
|        |                  | Me (g cm <sup>-3</sup> )  |          | VTP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) |           | MACRO (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) |           | MICRO (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) |             |  |  |
|        |                  | P1                        | P2       | P1                                    | P2        | P1                                      | P2        | P1                                      | P2          |  |  |
| T11    | 0,00-0,20        | 1,36 Fb                   | 1,53 Ba  | 43,85 ABCa                            | 40,32 ABa | 19,83 ABCa                              | 22,42 Aa  | 24,02 ABa                               | 17,90 Db    |  |  |
|        | 0,20-0,40        | 1,51 ABCDEFa              | 1,61 ABa | 44,68 ABCa                            | 39,75 ABb | 20,21 ABCa                              | 17,35 ABa | 24,47 ABa                               | 22,40 BCDA  |  |  |
|        | 0,40-0,60        | 1,72 Aa                   | 1,60 ABa | 38,41 Ca                              | 39,62 ABa | 9,06 Ca                                 | 11,54 ABa | 29,34 ABa                               | 28,08 ABCDA |  |  |
|        | 0,60-0,80        | 1,66 ABC a                | 1,66 ABa | 39,21 Ca                              | 40,93 ABa | 9,51 Ca                                 | 11,38 ABa | 29,70 Aa                                | 29,54 ABCa  |  |  |
| T7     | 0,00-0,20        | 1,38 EFb                  | 1,60 ABa | 48,84 Aa                              | 36,65 Bb  | 28,52 Aa                                | 18,72 ABb | 20,31 ABa                               | 17,93 Da    |  |  |
|        | 0,20-0,40        | 1,39 EFb                  | 1,67 ABa | 48,13 ABa                             | 39,24 ABb | 28,53 Aa                                | 15,78 ABb | 19,59 ABa                               | 23,46 BCDA  |  |  |
|        | 0,40-60          | 1,46 CDEFb                | 1,67 ABa | 47,14 ABa                             | 40,81 ABb | 23,67 ABa                               | 12,73 ABb | 23,46 ABa                               | 28,07 ABCDA |  |  |
|        | 0,60-0,80        | 1,66 ABCa                 | 1,62 ABa | 39,09 Cb                              | 46,41 Aa  | 10,72 Ca                                | 12,30 ABa | 28,36 ABa                               | 34,11 Aa    |  |  |
| T3     | 0,00-0,20        | 1,45 CDEFb                | 1,67 ABa | 46,85 ABa                             | 42,56 ABa | 27,73 Aa                                | 22,83 Aa  | 19,11 Ba                                | 19,68 CDA   |  |  |
|        | 0,20-0,40        | 1,58 ABCDEFb              | 1,72 ABa | 47,17 ABa                             | 38,67 Bb  | 22,71 ABa                               | 15,38 ABb | 24,46 ABa                               | 23,29 BCDA  |  |  |
|        | 0,40-0,60        | 1,66 ABCa                 | 1,60 ABa | 41,76 ABCa                            | 41,19 ABa | 14,45 BCa                               | 14,26 ABa | 27,31 ABa                               | 26,92 ABCDA |  |  |
|        | 0,60-0,80        | 1,67 ABCa                 | 1,75 Aa  | 40,63 BCa                             | 41,61 ABa | 10,57 Ca                                | 10,46 Ba  | 30,05 Aa                                | 31,15 ABa   |  |  |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da massa específica do solo, Volume Total Poros, Macroporosidade e Microporosidade, 4,35%, 6,06%, 26,33% e 14,17%, respectivamente.

O volume total de poros apresentou uma correlação inversa entre os pontos para microporosidade, sendo que em P1 apresentou negativa ( $r = -0,49$ ) e positiva ( $r = 0,47$ ) para P2, esse resultado mostra que a volume total de poros no P2 está relacionado a microporosidade, efeito esse da compactação do solo nesse ponto, não apresentando correlação significativa para macroporosidade do solo (Figura 3). O P1 apresentou uma alta correlação ( $r = 0,87$ ) com a macroporosidade do solo (Figura 4), mostrando o efeito da subsolagem nesse ponto.

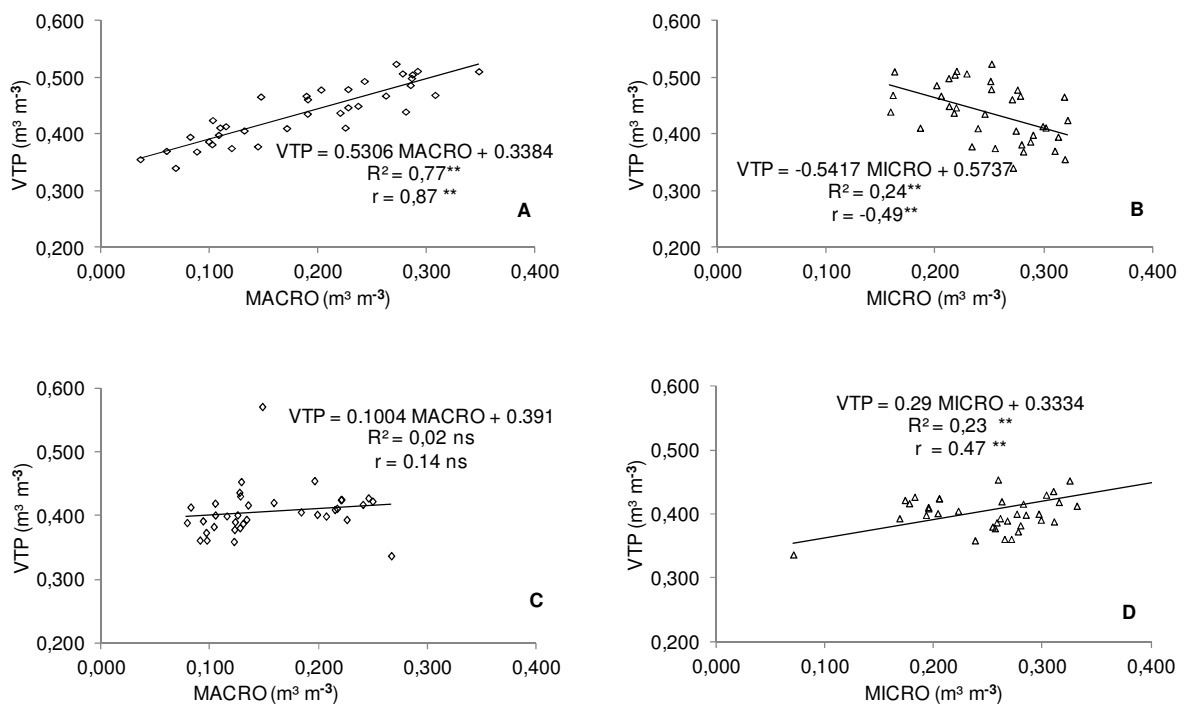


FIGURA 3. Correlação de Pearson e regressão linear entre volume total de poros (VTP) e Macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) no P1 (A e B) e P2 (C e D) ( $r^{**}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de t,  $R^2^{**}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

#### 4.2 Resistência do solo à penetração (RP)

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou coeficiente de variação baixo sendo 15,41 %, mostrando a alta precisão na condução do experimento. A RP apresentou menores valores em P1 para todas as profundidades estudadas

diferindo-se do P2, sendo que ocorreu um aumento da RP com a profundidade do solo, tanto para P1 quanto para P2 (Tabela 5). A umidade do solo, no momento dos testes de RP, apresentava-se estatisticamente igual para os dois pontos, com relação às profundidades estudadas, sendo que acamada de 0,40-0,80 m no P1 e P2 apresentaram as maiores médias (Tabela 5). Entre os pontos apenas na camada de 0,40-0,60 m ocorreu diferença estatística.

Analisando a média da resistência nos talhões T7 e T3 estudados, observa-se que a RP e a umidade do solo não apresentaram diferenças estatísticas entre os talhões, exceto para T11 (Tabela 6). O ponto P1 apresentou sempre menor resistência em relação ao ponto P2 e a umidade do solo diferiu entre os pontos apenas no talhão T11. Resultados semelhantes foram encontrados por Araújo et al. (2004), onde a escarificação do solo promoveu efeitos benéficos na camada de 0,00-0,15 m principalmente em relação à porosidade de aeração.

TABELA 5. Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo, determinadas na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, na média de três talhões de produção de café Conilon

| Profundidade (m) | RP (MPa)                         |           |
|------------------|----------------------------------|-----------|
|                  | P1                               | P2        |
| 0,00-0,20        | 1,54 Cb                          | 3,77 Ca   |
| 0,20-0,40        | 2,60 BCb                         | 8,91 Ba   |
| 0,40-0,60        | 4,42 Bb                          | 10,88 ABa |
| 0,60-0,80        | 8,07 Ab                          | 13,09 Aa  |
|                  | Umidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) |           |
| 0,00-0,20        | 0,165 Ca                         | 0,176 Ca  |
| 0,20-0,40        | 0,264 Ba                         | 0,247 Ba  |
| 0,40-0,60        | 0,286 Aba                        | 0,259 ABb |
| 0,60-0,80        | 0,293 Aa                         | 0,280 Aa  |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da RP e umidade do solo 15,41% e 5,08 %, respectivamente.

TABELA 6. Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo, determinadas na linha (P1) e na entrelinha (P2), em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão                           | RP (MPa) |          |
|----------------------------------|----------|----------|
|                                  | P1       | P2       |
| T11                              | 3,05 Ab  | 7,04 Ba  |
| T7                               | 4,90 Ab  | 10,29 Aa |
| T3                               | 4,51 Ab  | 10,15 Aa |
| Umidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) |          |          |
| T11                              | 0,253 Aa | 0,232 Ab |
| T7                               | 0,245 Aa | 0,244 Aa |
| T3                               | 0,257 Aa | 0,243 Aa |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da RP e umidade do solo 15,41% e 5,08 %, respectivamente.

As camadas de 0,00-0,40 m do solo na P1 foram as que apresentaram menor RP para praticamente todos os talhões, exceto o T7 (Tabela 7), com valores menores que 2,0 MPa para a camada de 0,00-0,20 m, valor esse aceito por alguns autores como limitante para desenvolvimento radicular (ARSHAD et al., 1996; TORMENTA et al., 1998; TORRES & SARAIVA, 1999; LAPEN et al., 2004; SENRA et al., 2007). Para camada de 0,20-0,40 m os valores de RP foram menores que 2,5 MPa, valor esse considerado por outros autores como o máximo para desenvolvimento das culturas (TAYLOR, 1971; CANARACHE, 1990; UNGER & KASPAR, 1994).

Esses resultados demonstram a importância do preparo inicial do solo até a profundidade de 0,40 m, camada que sofre uma melhoria com a subsolagem melhorando assim o desenvolvimento radicular das plantas. Segundo Rena & Guimarães (2000), o sistema radicular do cafeeiro é pseudo pivotante, pois, na maioria dos casos, suas raízes se apresentam curtas, grossas e terminam abruptamente. Raramente estende-se a mais que 0,45 m abaixo da superfície do solo e, frequentemente, são múltiplas.

Segundo Partelli et al. (2006), para café Conilon, a maior concentração de raízes (comprimento e área superficial por volume de solo) da espécie propagada via seminal ou estaquia, encontra-se na camada superficial concentrando aproximadamente 50% na camada de 0,00-0,10 m e mais de 65% nas camadas de 0,00-0,20 m de solo, ficando o restante nas camadas mais profundas. Silva & Martins (2010) trabalharam com algumas propriedades físicas do solo cultivado com

café Conilon e verificaram também que as raízes se concentram na faixa mais superficial do solo, diminuindo em profundidade à medida que se aproximam da profundidade de 0,40 m. Embora os trabalhos anteriores mostrem uma tendência de concentração de raízes nas camadas mais superficiais do solo um aprofundamento desse sistema radicular, como melhorias nos atributos físico-hídricos do solo irá possibilitar um aumento da capacidade de utilização da água armazenada no solo, reduzindo os riscos do estresse hídrico em razão da interrupção das irrigações, ou mesmo de um maior intervalo entre chuvas.

TABELA 7. Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo determinados na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão | Profundidade (m) | RP (Mpa)  |           | Umidade ( $m^3 m^{-3}$ ) |            |
|--------|------------------|-----------|-----------|--------------------------|------------|
|        |                  | P1        | P2        | P1                       | P2         |
| T11    | 0,00-0,20        | 1,34 Da   | 3,05 Fa   | 0,158 Da                 | 0,165 Da   |
|        | 0,20-0,40        | 2,03 CDb  | 7,73 DEa  | 0,264 BCa                | 0,234 Cb   |
|        | 0,40-0,60        | 3,97 BCDB | 8,41 CDa  | 0,301 Aa                 | 0,251 ABCb |
|        | 0,60-0,80        | 4,88 BCb  | 8,98 CDa  | 0,288 ABa                | 0,278 ABa  |
| T7     | 0,00-0,20        | 1,80 Da   | 3,51 Fa   | 0,168 Da                 | 0,181 Da   |
|        | 0,20-0,40        | 3,74 BCDB | 9,78 CDa  | 0,251 Ca                 | 0,249 BCa  |
|        | 0,40-0,60        | 4,19 BCDB | 12,97 ABa | 0,264 BCa                | 0,271 ABa  |
|        | 0,60-0,80        | 9,89 Ab   | 14,91 Aa  | 0,297 ABa                | 0,276 ABb  |
| T3     | 0,00-0,20        | 1,45 Db   | 4,77 EFa  | 0,168 Da                 | 0,180 Da   |
|        | 0,20-0,40        | 2,03 CDb  | 9,21 CDa  | 0,275 ABCa               | 0,254 ABCb |
|        | 0,40-0,60        | 5,11 Bb   | 11,26 BCa | 0,291 ABa                | 0,254 ABCb |
|        | 0,60-0,80        | 9,44 Ab   | 15,37 Aa  | 0,293 ABa                | 0,286 Aa   |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da RP e umidade do solo 15,41% e 5,08 %, respectivamente.

Foi observada correlação positiva entre RP e Me ( $r = 0,45$ ) e também entre RP e MICRO ( $r = 0,49$ ) para o P1 (Figura 5). Neste mesmo ponto observou-se uma correlação negativa ( $r = -0,52$ ) com MACRO. Utilizando-se valores limites de MACRO de  $0,09 m^3 m^{-3}$  na equação de regressão, obtém-se valor de RP igual a 10,86 MPa. Esse valor representa uma Me de  $1,70 g cm^{-3}$ , sendo que valores superiores a esse dificultaria a aeração das plantas para o P1.

Uma correlação positiva foi encontrada com a MICRO ( $r = 0,69$ ) devido à compactação do solo, que altera o arranjo das partículas, resultando no seu

empacotamento, ou seja, aproximando-as e incrementando a presença de poros de tamanho menor (Figura 3).

O VTP apresentou correlação inversa entre o P1 e P2, sendo negativa ( $r = -0,41$ ) e positiva ( $r = 0,40$ ), respectivamente (Figuras 4 e 5), esse resultado de P2 pode ser explicado, já que o VTP em P2 apresenta uma correlação positiva com a microporosidade (Figura 3), fazendo com que o aumento de VTP nesse ponto aumente a RP. Em relação a P1, fica evidente que a descompactação promove aumento do volume total de poros.

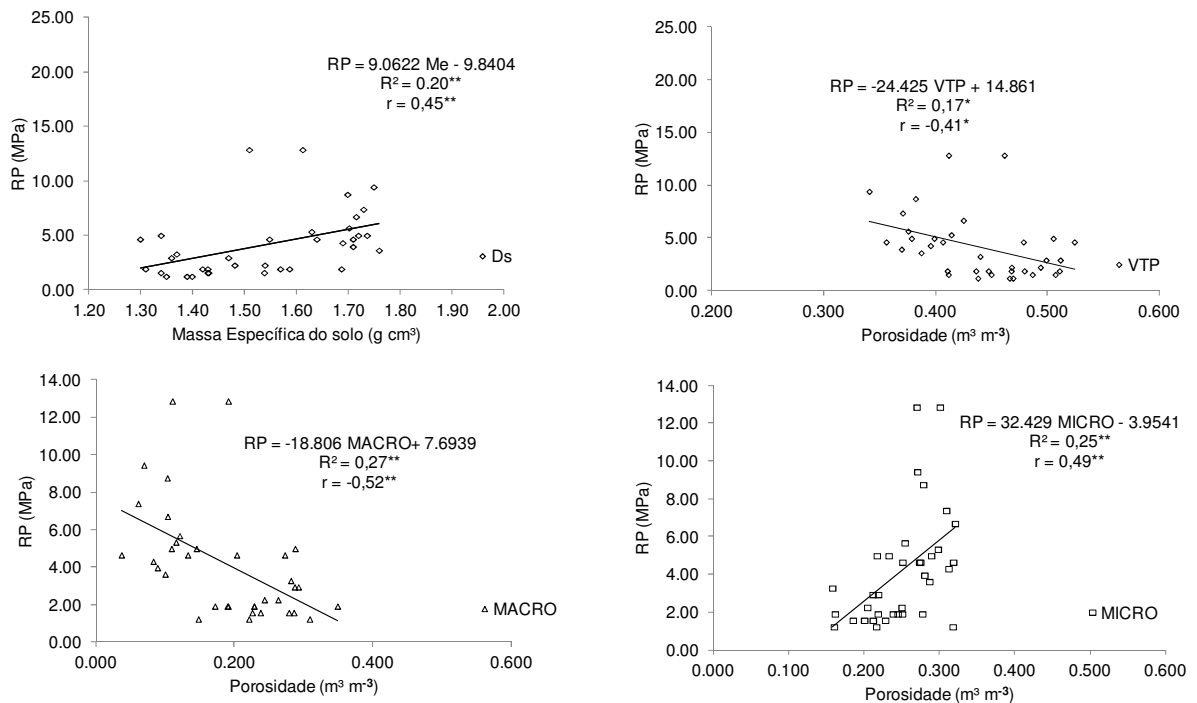


FIGURA 4. Correlação de Pearson e regressão linear entre resistência do solo à penetração (RP) e massa específica do solo (Me), Volume total de poros (VTP), macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) no P1. ( $r^{***}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de t,  $R^2^{***}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

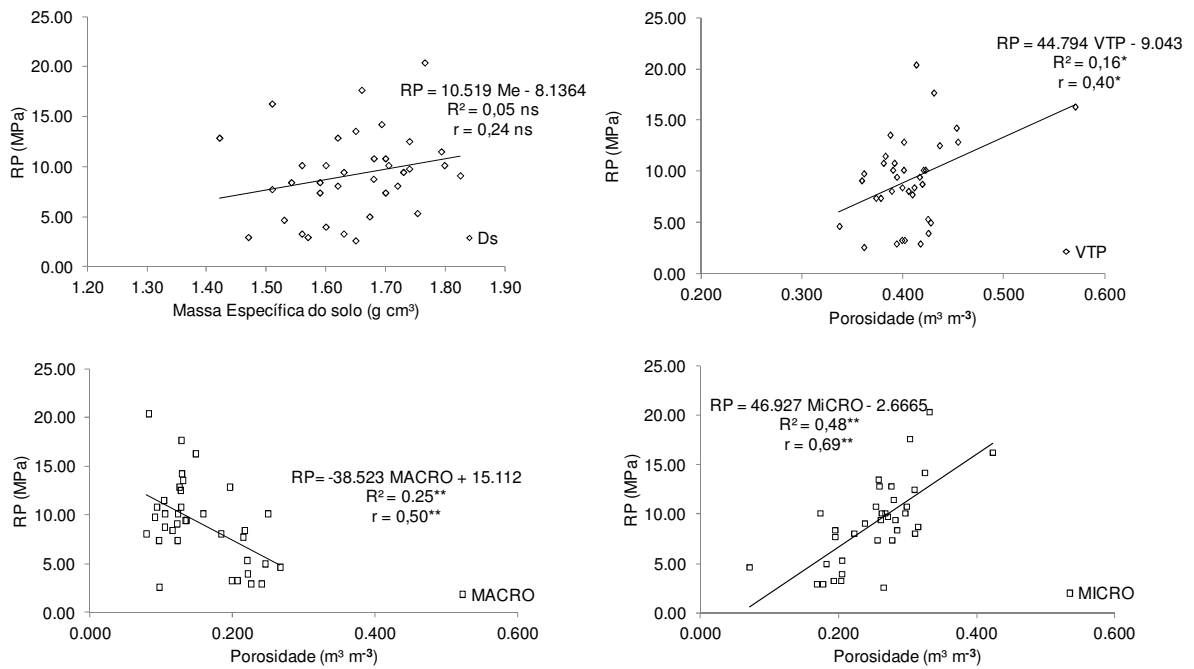


FIGURA 5. Correlação de Pearson e regressão linear entre resistência à penetração do solo (RP) e massa específica do solo (Me), Volume total de poros (VTP), macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) no P2. (r<sup>\*\*\*</sup> : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de t, R<sup>2\*\*\*</sup> : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

### 4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat)

Na Tabela 8 pode-se verificar que os valores das condutividades hidráulicas apresentaram diferenças estatísticas entre os pontos estudados, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. Observou-se um decréscimo acentuado da condutividade hidráulica com o aumento da profundidade, sendo que no P1 a camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m apresentaram maiores valores de Ksat diferindo entre si e das demais camadas e, para P2 apenas a camada de 0,00-0,20 m apresentou maior Ksat diferindo das demais camadas. Não houve diferença entre os talhões estudados tanto para P1 e P2, existindo apenas entre os pontos (Tabela 9 e 10). Portanto, este solo apresenta originalmente (P2) uma grande redução da Ksat com o aumento da profundidade devido à presença de horizonte B coeso, característico de solos de Tabuleiros Costeiros, como os que ocorrem na região de São Mateus, ES. Esses horizontes têm início a uma profundidade média entre de 0,35 a 0,60 m e são



caracterizados por incremento no teor de argila, o que pode chegar a enquadrá-los na classe dos Argissolos ou permanecerem como os Latossolos, ambos Amarelos. O preparo do solo, com subsolagem, por sua vez, possibilitou um aumento significativo da Ksat (P1), notadamente na camada de 0,20-0,40 m, efeito esse resultante do aumento do volume total de poros proporcionado pelo preparo do solo e até mesmo também pelas raízes, com possível desenvolvimento de bioporos no solo com o tempo.

TABELA 8. Condutividade hidráulica do solo determinada na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, na média de três talhões de produção de café Conilon

| Profundidade (m) | Condutividade hidráulica do solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) |           |
|------------------|---|-----------|
|                  | P1  | P2        |
| 0,00-0,20        | 391,88 Aa   | 147,13 Ab |
| 0,20-0,40        | 151,91 Ba   | 3,55 Bb   |
| 0,40-0,60        | 4,96 Ca   | 0,84 Ba   |
| 0,60-0,80        | 0,50 Ca   | 0,28 Ba   |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da Ksat 43,61%.

TABELA 9. Condutividade hidráulica do solo determinada na linha (P1) e na entrelinha (P2), em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão | Condutividade hidráulica do solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) |          |
|--------|---|----------|
|        | P1  | P2       |
| T11    | 139,27 Aa   | 32,07 Ab |
| T7     | 132,07 Aa   | 41,95 Ab |
| T3     | 140,59 Aa   | 39,83 Ab |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da Kfs 43,61%.

Na Tabela 10 pode-se observar um comportamento semelhante para todos os talhões, pontos e profundidades estudados nesse trabalho. A camada de 0,00-0,20 m para T11 apresentou a maior Ksat do solo, fato que pode estar relacionado com uma melhor estruturação do solo nessa camada. Segundo Viera & Muzilli

(1984) e Castro et al. (1987) o revolvimento do solo aumenta a proporção de macroporos. Trabalhos de Correa (1985), Pelegrini et al.(1990), Moreti et al.(2006), Vieira & Klein (2007) e Mentges et al. (2010) corroboram os resultados desse trabalho em que o revolvimento do solo proporcionou aumento na Ksat. Os macroporos aumentam a condutividade hidráulica do solo, proporcionando uma rápida drenagem do solo, combinando essa característica com uma maior retenção de água no solo, proporcionando assim um melhor aproveitamento da água provenientes da irrigação ou chuva.

TABELA 10. Condutividade hidráulica do solo determinada na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão | Profundidade (m) | Condutividade hidráulica do solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) |           |
|--------|------------------|---|-----------|
|        |                  | P1  | P2        |
| T11    | 0,00-0,20        | 407,25 Aa   | 124,50 Ab |
|        | 0,20-0,40        | 144,94 Ba   | 2,79 Bb   |
|        | 0,40-0,60        | 4,47 Ca   | 0,70 Ba   |
|        | 0,60-0,80        | 0,42 Ca   | 0,28 Ba   |
| T7     | 0,00-0,20        | 373,18 Aa   | 163,33 Ab |
|        | 0,20-0,40        | 149,75 Ba   | 3,28 Bb   |
|        | 0,40-0,60        | 4,85 Ca   | 0,92 Ba   |
|        | 0,60-0,80        | 0,52 Ca   | 0,29 Ba   |
| T3     | 0,00-0,20        | 395,23 Aa   | 153,56 Ab |
|        | 0,20-0,40        | 161,03 Ba   | 4,59 Bb   |
|        | 0,40-0,60        | 5,56 Ca   | 0,91 Ba   |
|        | 0,60-0,80        | 0,55 Ca   | 0,28 Ba   |

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV%) da Kfs 43,61%.

A Ksat apresentou correlação negativa com a RP para os pontos P1 e P2 ( $r = -0,65$  e  $r = -0,70$ ), o que é coerente, já que a interferência causada pela compactação na estrutura do solo e no seu arranjo, os quais se refletem na maior RP, inferem negativamente no fluxo hidráulico no solo. Analisando a porosidade do solo, observou-se que o P1 apresentou valores de correlação superiores ao P2 (Figura 6 e 7) e que VPT em P2, apesar de não significativa, também exibe tendência de correlação negativa com Ksat, fato esse que pode ser

explicado pela correlação positiva obtida com a microporosidade do solo (Figura 4), reduzindo assim a condutividade do solo com aumento do VTP.

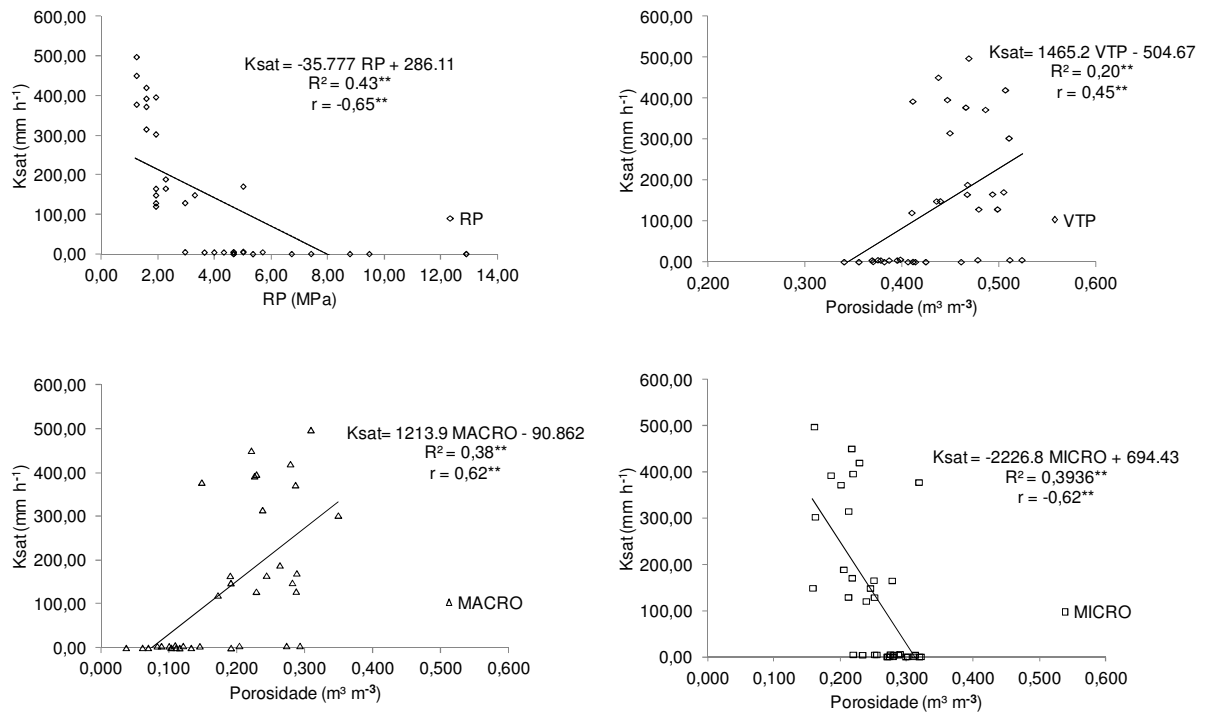


FIGURA 6. Correlação de Pearson e regressão linear entre condutividade hidráulica do solo ( $K_{sat}$ ) e resistência à penetração (RP), volume total de poros (VTP), macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) no P1. ( $r^{***}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de t,  $R^2^{***}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

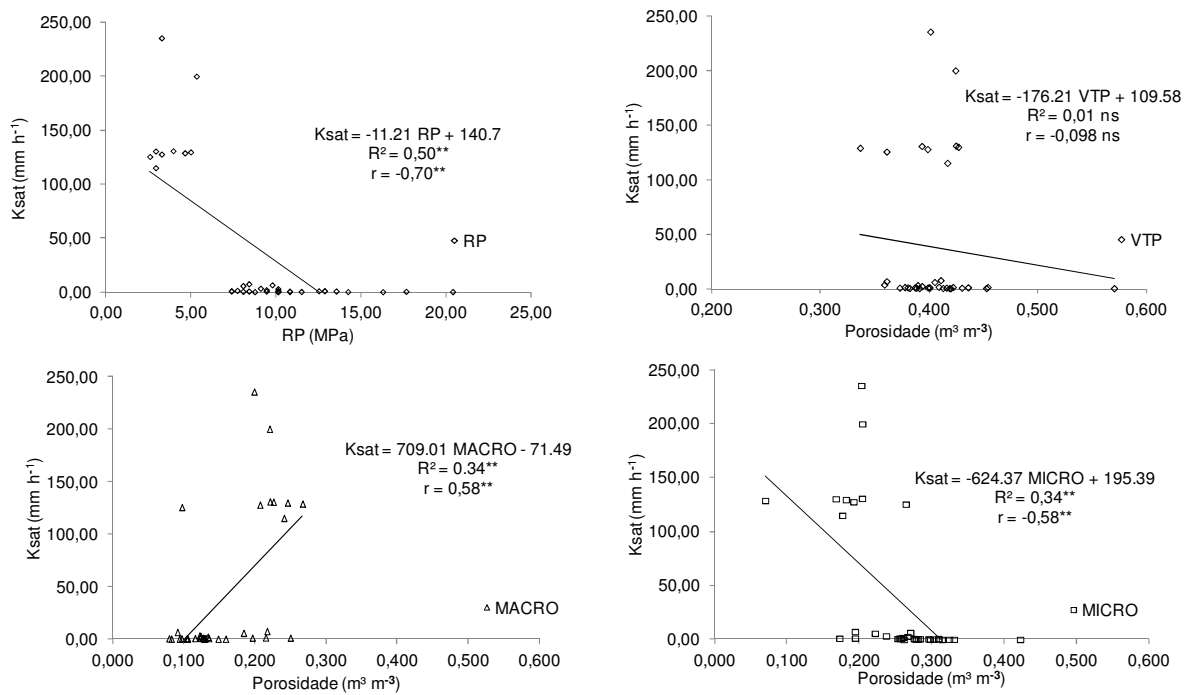


FIGURA 7. Correlação de Pearson e regressão linear entre condutividade hidráulica do solo ( $K_{sat}$ ) e resistência à penetração (RP) (esquerda) e volume total de poros (VTP), macroporosidade (MACRO) e microporosidade (MICRO) (direita) no P2. ( $r^{***}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de t,  $R^{2***}$  : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

#### 4.4 Curva de retenção, disponibilidade de água no solo e água prontamente disponível

No ajuste das curvas de retenção de água o modelo de Van Genuchten apresentou alto poder explicativo, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 98% para todos os talhões estudados (Tabela 11). Portanto, o modelo de Van Genuchten caracteriza bem a relação entre o conteúdo de água no solo dentro do intervalo de potencial matricial avaliado. Os parâmetros de ajuste da curva, de modo geral, apresentaram redução na média com a profundidade.

TABELA 11. Umidade de saturação ( $\theta_s$ ), umidade residual ( $\theta_r$ ), parâmetros de ajuste da curva de retenção e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) determinados na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Talhão                      | Ponto | Profundidade (m) |           |           |           |
|-----------------------------|-------|------------------|-----------|-----------|-----------|
|                             |       | 0,00-0,20        | 0,20-0,40 | 0,40-0,60 | 0,60-0,80 |
| $\theta_s$ ( $m^3 m^{-3}$ ) |       |                  |           |           |           |
| T11                         | P1    | 0,496            | 0,494     | 0,440     | 0,441     |
|                             | P2    | 0,458            | 0,447     | 0,448     | 0,466     |
| T7                          | P1    | 0,548            | 0,544     | 0,525     | 0,449     |
|                             | P2    | 0,486            | 0,454     | 0,452     | 0,519     |
| T3                          | P1    | 0,519            | 0,480     | 0,467     | 0,446     |
|                             | P2    | 0,555            | 0,429     | 0,461     | 0,454     |
| $\theta_r$ ( $m^3 m^{-3}$ ) |       |                  |           |           |           |
| T11                         | P1    | 0,142            | 0,194     | 0,245     | 0,251     |
|                             | P2    | 0,144            | 0,190     | 0,247     | 0,257     |
| T7                          | P1    | 0,159            | 0,150     | 0,181     | 0,236     |
|                             | P2    | 0,133            | 0,194     | 0,221     | 0,282     |
| T3                          | P1    | 0,137            | 0,183     | 0,212     | 0,245     |
|                             | P2    | 0,185            | 0,172     | 0,217     | 0,254     |
| $\alpha$                    |       |                  |           |           |           |
| T11                         | P1    | 1,1395           | 5,0448    | 1,7956    | 2,7550    |
|                             | P2    | 11,1671          | 7,4909    | 3,3067    | 0,5974    |
| T7                          | P1    | 9,9433           | 7,1549    | 3,6329    | 1,6294    |
|                             | P2    | 9,6720           | 4,2884    | 2,1155    | 1,3847    |
| T3                          | P1    | 6,9553           | 3,5862    | 1,7947    | 1,9300    |
|                             | P2    | 8,9208           | 3,0641    | 2,3877    | 1,6870    |
| $n$                         |       |                  |           |           |           |
| T11                         | P1    | 1,5889           | 1,3912    | 1,3650    | 1,3312    |
|                             | P2    | 1,3703           | 1,3682    | 1,3789    | 1,4914    |
| T7                          | P1    | 1,3925           | 1,4259    | 1,4596    | 1,4202    |
|                             | P2    | 1,3740           | 1,3841    | 1,3875    | 1,4499    |
| T3                          | P1    | 1,4144           | 1,4016    | 1,4382    | 1,3925    |
|                             | P2    | 1,3873           | 1,3792    | 1,4202    | 1,3988    |
| $m$                         |       |                  |           |           |           |
| T11                         | P1    | 0,3706           | 0,2812    | 0,2674    | 0,2488    |
|                             | P2    | 0,2702           | 0,2691    | 0,2748    | 0,3295    |
| T7                          | P1    | 0,2818           | 0,2987    | 0,3149    | 0,2959    |
|                             | P2    | 0,2722           | 0,2775    | 0,2793    | 0,3103    |
| T3                          | P1    | 0,2930           | 0,2865    | 0,3047    | 0,2819    |
|                             | P2    | 0,2792           | 0,2749    | 0,2959    | 0,2851    |

TABELA 11. CONTINUAÇÃO

|            |    | $R^2$ |       |       |       |
|------------|----|-------|-------|-------|-------|
| <b>T11</b> | P1 | 0,991 | 0,997 | 0,990 | 0,988 |
|            | P2 | 0,998 | 0,997 | 0,994 | 0,993 |
| <b>T7</b>  | P1 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,993 |
|            | P2 | 0,997 | 0,997 | 0,994 | 0,995 |
| <b>T3</b>  | P1 | 0,999 | 0,997 | 0,997 | 0,993 |
|            | P2 | 0,998 | 0,996 | 0,998 | 0,995 |

No T11 as curvas apresentaram comportamento semelhante para as camadas de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60, 0,60-0,80 m, onde P1 apresentou maior conteúdo de água retido na CC ( $pF$  2,0 = 10 kPa), em relação ao P2 e uma maior inclinação da curva nas baixas tensões, favorecendo assim à maior disponibilidade de água especialmente na camada 0,00-0,20 m. O PMP ( $pF$  4,2 = 1500 kPa) apresentou-se praticamente igual para todas as profundidades. O aumento de disponibilidade de água verificado nesse talhão nas camadas de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, deve-se ao maior conteúdo de água retido nessas camadas no P1 em relação ao P2 (Figura 8 e Tabela 12).

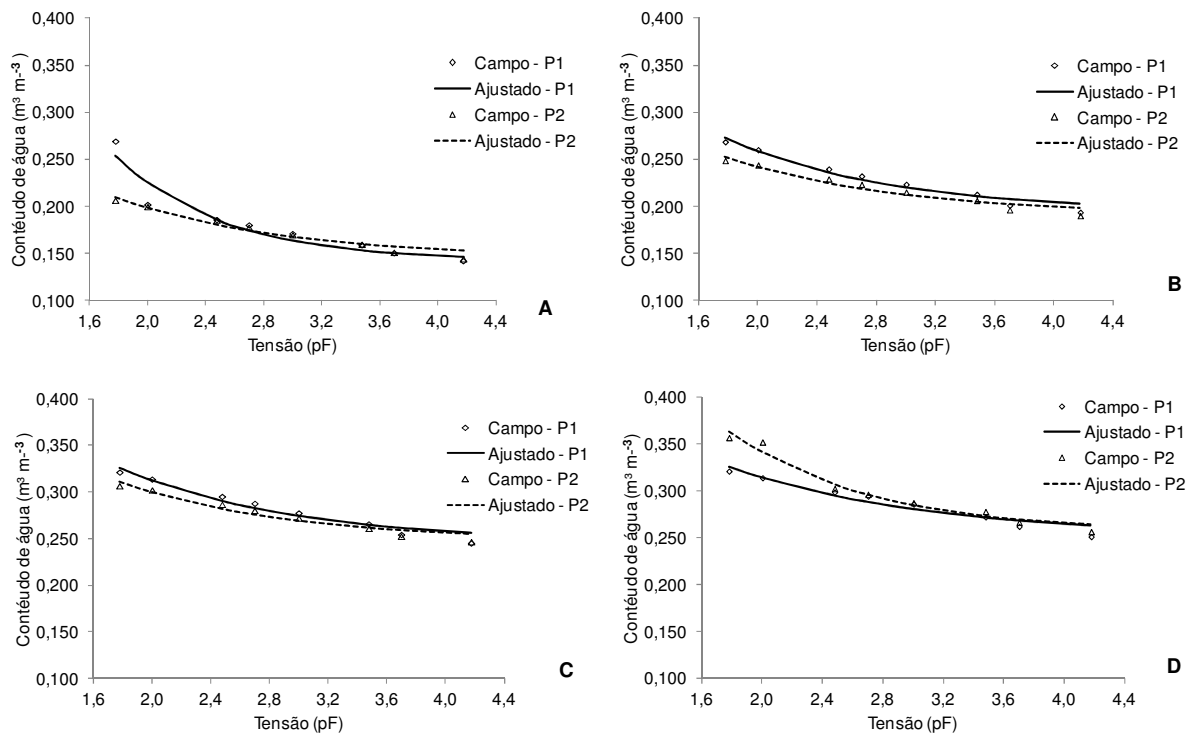


FIGURA 8. Curvas de retenção de água no solo do T11 em dois pontos P1 (linha) e P2 (entrelinha) em quatro profundidades 0,00-0,20 m (A), 0,20-0,40 m (B), 0,40-0,60 m (C) e 0,60-0,80 m (D).

No T7 as curvas apresentaram maior conteúdo de água retida no P2 em todas as tensões avaliadas nas camadas de 0,20-0,80 m em relação ao P1, fato esse relacionado a uma maior microporosidade nessas camadas, proporcionando uma maior retenção de água nesse ponto em relação ao P1. A camada de 0,00-0,20 m apresentou comportamento inverso ao P2, devido uma menor microporosidade, na camada de 0,20-0,40 m apesar de apresentar maior conteúdo de água retido em P2, a maior inclinação da curva no P1, mostrando um maior conteúdo de água retido nas baixas tensões favorecendo uma maior disponibilidade de água nessa camada (Tabela 12). Assim como no T11, a camada de 0,00-0,20 m apresentou maior disponibilidade de água no P1 e menor na camada de 0,60-0,80 m (Figura 9 e Tabela 12). A camada de 0,40-0,60 m apresentou um comportamento semelhante entre as curvas proporcionando uma pequena diferença entre o P1 e P2.

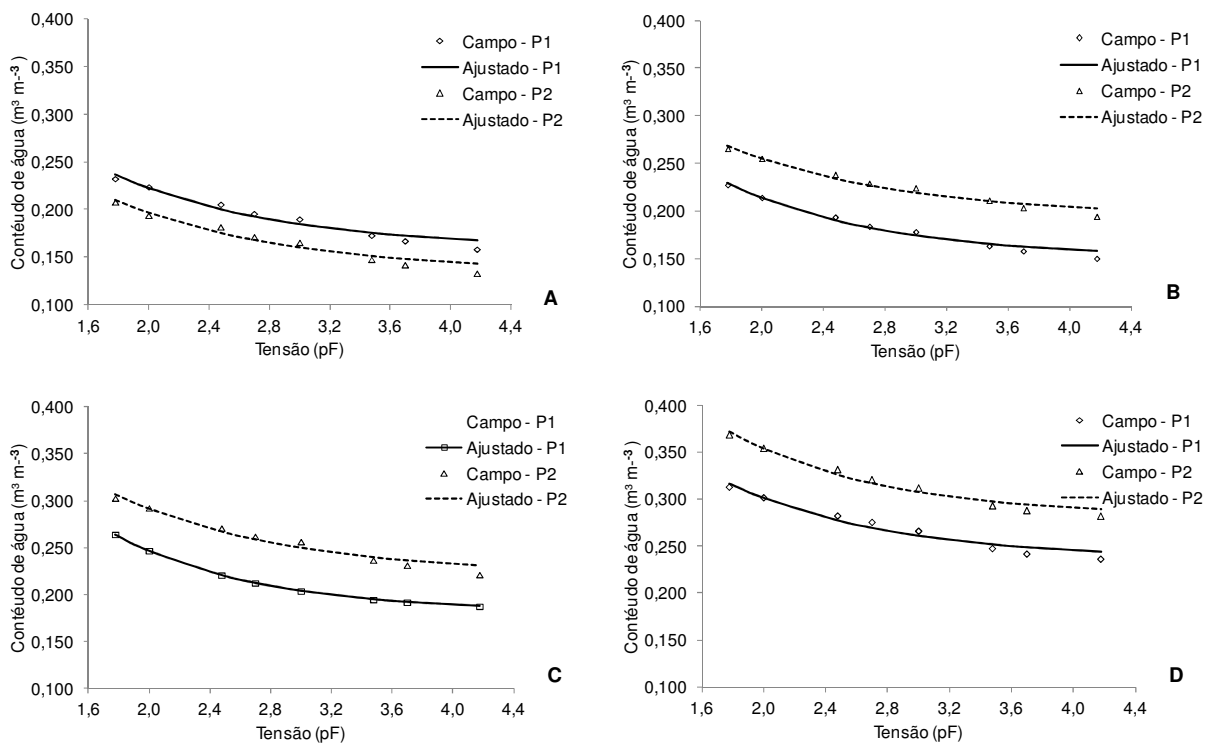


FIGURA 9. Curvas de retenção de água no solo do T7 em dois pontos P1 (linha) e P2 (entrelinha) em quatro profundidades 0,00-0,20 m (A), 0,20-0,40 m (B), 0,40-0,60 m (C) e 0,60-0,80 m (D).

O T3 apresentou maior disponibilidade de água em P1 nas camadas de 0,00-0,60 m, devido à maior retenção de água em tensões mais baixas, sendo que essa observação pode ser verificada na camada de 0,00-0,20 m (Figura 10 e Tabela

12). A camada 0,60-0,80 m apresentou os mesmos resultados do T11 e T7. A camada de 0,20-0,40 m apresentou uma pequena diferença de disponibilidade de água entre os pontos. Os resultados aqui mostram que o efeito do revolvimento do solo proporcionou um aumento do conteúdo de água retido a baixas tensões levando a uma maior disponibilidade de água para planta no P1, pois em camadas compactadas a disponibilidade de água é reduzida como relatado por Goedert et al. (2002), Kiliç et al. (2004) e Megda et al. (2008).

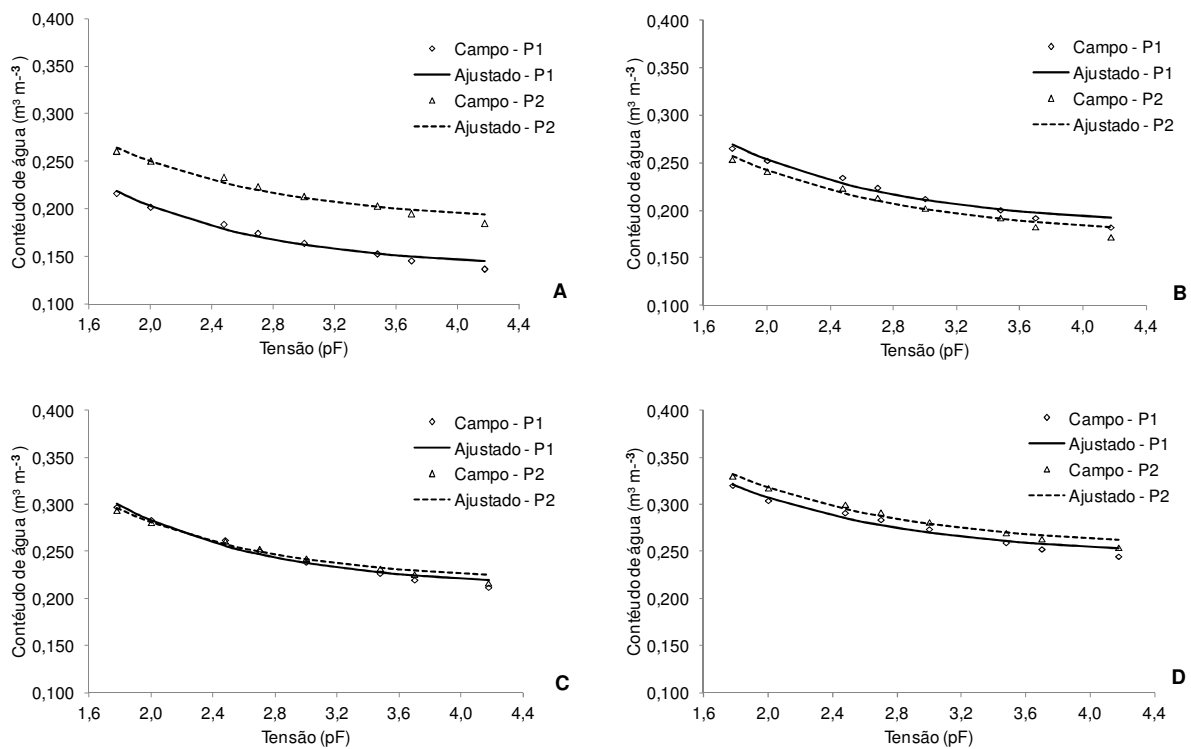


FIGURA 10. Curvas de retenção de água no solo do T3 em dois pontos P1 (linha) e P2 (entrelinha) em quatro profundidades 0,00-0,20 m (A), 0,20-0,40 m (B), 0,40-0,60 m (C) e 0,60-0,80 m (D).



TABELA 12. Médias da disponibilidade total de água (DTA) em dois pontos P1 (linha) e P2 (entrelinha) e quatro profundidades, com relação a talhões com três idades, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Profundidade (m) | Ponto | Talhão | DTA (mm cm <sup>-1</sup> ) |
|------------------|-------|--------|----------------------------|
| 0,00-0,20        | P1    | T11    | 0,794                      |
|                  |       | T7     | 0,550                      |
|                  |       | T3     | 0,575                      |
|                  | P2    | T11    | 0,462                      |
|                  |       | T7     | 0,540                      |
|                  |       | T3     | 0,556                      |
| 0,20-0,40        | P1    | T11    | 0,555                      |
|                  |       | T7     | 0,563                      |
|                  |       | T3     | 0,610                      |
|                  | P2    | T11    | 0,441                      |
|                  |       | T7     | 0,523                      |
|                  |       | T3     | 0,595                      |
| 0,40-0,60        | P1    | T11    | 0,567                      |
|                  |       | T7     | 0,593                      |
|                  |       | T3     | 0,636                      |
|                  | P2    | T11    | 0,453                      |
|                  |       | T7     | 0,604                      |
|                  |       | T3     | 0,563                      |
| 0,60-0,80        | P1    | T11    | 0,511                      |
|                  |       | T7     | 0,575                      |
|                  |       | T3     | 0,538                      |
|                  | P2    | T11    | 0,775                      |
|                  |       | T7     | 0,645                      |
|                  |       | T3     | 0,557                      |

O conteúdo de água prontamente disponível (APD) para as plantas foi superior no P1 com relação ao P2 na camada de 0,00-0,60 m, ocorrendo um aumento com a profundidade, nessa mesma camada, notadamente em T11 e T7 (Tabela 13). O aumento da ADP em profundidade pode estar relacionado aos microporos, que tiveram o mesmo comportamento (Tabela 2), que por sua vez estão relacionados à textura (Tabela1), cujo incremento é característico dos solos coesos desta região. Segundo Marchão et al. (2007) valores superiores de microporosidade promoveram aumento na água prontamente disponível (APD), a MICRO e APD expressam a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas. Costa et al. (2009) relatam que modificações na capacidade de campo alteraram a água prontamente disponível (APD).

TABELA 13. Água prontamente disponível (APD) determinada na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Profundidade (m) | T11                        |       | T7    |       | T3    |       |
|------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | P1                         | P2    | P1    | P2    | P1    | P2    |
|                  | APD (mm cm <sup>-1</sup> ) |       |       |       |       |       |
| 0,00-0,20        | 0,621                      | 0,314 | 0,380 | 0,368 | 0,404 | 0,383 |
| 0,20-0,40        | 0,383                      | 0,299 | 0,399 | 0,359 | 0,424 | 0,407 |
| 0,40-0,60        | 0,383                      | 0,310 | 0,430 | 0,415 | 0,454 | 0,397 |
| 0,60-0,80        | 0,336                      | 0,569 | 0,405 | 0,464 | 0,371 | 0,386 |

#### 4.5 Índice S

A qualidade estrutural do solo, considerando o índice S, apresentou-se de boa ( $0,050 > S \geq 0,035$ ) a muito boa ( $S \geq 0,050$ ), de acordo com Dexter (2004), apresentando altos valores do índice S para a linha de cafeeiro, praticamente em todas as profundidades exceto para a camada de 0,60-0,80 m em T11 (Tabela 14). O T7 para o P1, verificou-se um maior índice S nas camadas de 0,20-0,60 m em relação aos demais talhões estudados, fato ligado ao maior volume de total de poros presentes, decorrente da maior estruturação deste solo (Tabela 4). Este resultado corrobora com Tormena et al. (2008), estudando a hipótese de que o S poderia ser utilizado como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico. Aqueles autores verificaram que, maiores valores de S na linha, tanto em plantio direto com em plantio convencional em milho e relataram ainda uma redução no índice S com aumento da massa específica do solo, indicando redução da qualidade estrutural do solo com a compactação.

O alto índice S ( $S > 0,050$ ) na camada de 0,00-0,40 m em P2 pode estar relacionado ao acúmulo de matéria orgânica, obtida pela deposição de restos culturais no manejo de podas, deixados na entrelinha do cafeeiro.

TABELA 14. Índice S determinado na linha (P1) e na entrelinha (P2), em quatro profundidades de amostragem, em três talhões de produção de café Conilon, T11 (11 anos), T7 (7 anos) e T3 (3 anos)

| Profundidade (m) | Ponto | Talhão | Índice S |
|------------------|-------|--------|----------|
| 0,00-0,20        | P1    | T11    | 0,094    |
|                  |       | T7     | 0,078    |
|                  |       | T3     | 0,079    |
|                  | P2    | T11    | 0,060    |
|                  |       | T7     | 0,068    |
|                  |       | T3     | 0,073    |
| 0,20-0,40        | P1    | T11    | 0,060    |
|                  |       | T7     | 0,083    |
|                  |       | T3     | 0,060    |
|                  | P2    | T11    | 0,049    |
|                  |       | T7     | 0,051    |
|                  |       | T3     | 0,050    |
| 0,40-0,60        | P1    | T11    | 0,037    |
|                  |       | T7     | 0,077    |
|                  |       | T3     | 0,055    |
|                  | P2    | T11    | 0,039    |
|                  |       | T7     | 0,046    |
|                  |       | T3     | 0,051    |
| 0,60-0,80        | P1    | T11    | 0,034    |
|                  |       | T7     | 0,045    |
|                  |       | T3     | 0,040    |
|                  | P2    | T11    | 0,049    |
|                  |       | T7     | 0,052    |
|                  |       | T3     | 0,040    |

Verificou-se também uma correlação negativa ( $r = -0,79$ ) entre a Me e o índice S na linha do cafeeiro (P1), de forma que quando aumenta a Me, o índice S sofre uma redução, incremento esse explicado por 63% da variabilidade de S, salientando a sensibilidade deste índice como indicador da mudança estrutural do solo (Figura 11), resultado que corrobora aqueles encontrados por Silva et al. (2012).

Maiores valores de índice S equivalem à maior inclinação da curva de retenção de água no solo (DEXTER, 2004), indicando melhor distribuição de poros e maior quantidade de poros com maior diâmetro (SILVA et al., 2012). Essa afirmação concorda com os resultados encontrados neste trabalho, nos quais a macroporosidade apresentou correlação positiva ( $r = 0,90$ ) na linha (P1) (Figura 11),

resultado semelhante ao encontrado por Stone et al.(2005). O VTP e MICRO também apresentaram boa correlação, como observado por Li et al. (2011) e Cunha et al. (2011). A MACRO apresentou o maior incremento no índice S no ponto P1, sendo responsável por 83% da variabilidade do índice S nesse ponto. Por outro lado, a VTP e o MICRO apresentaram coeficientes de determinação em torno de 60 %.

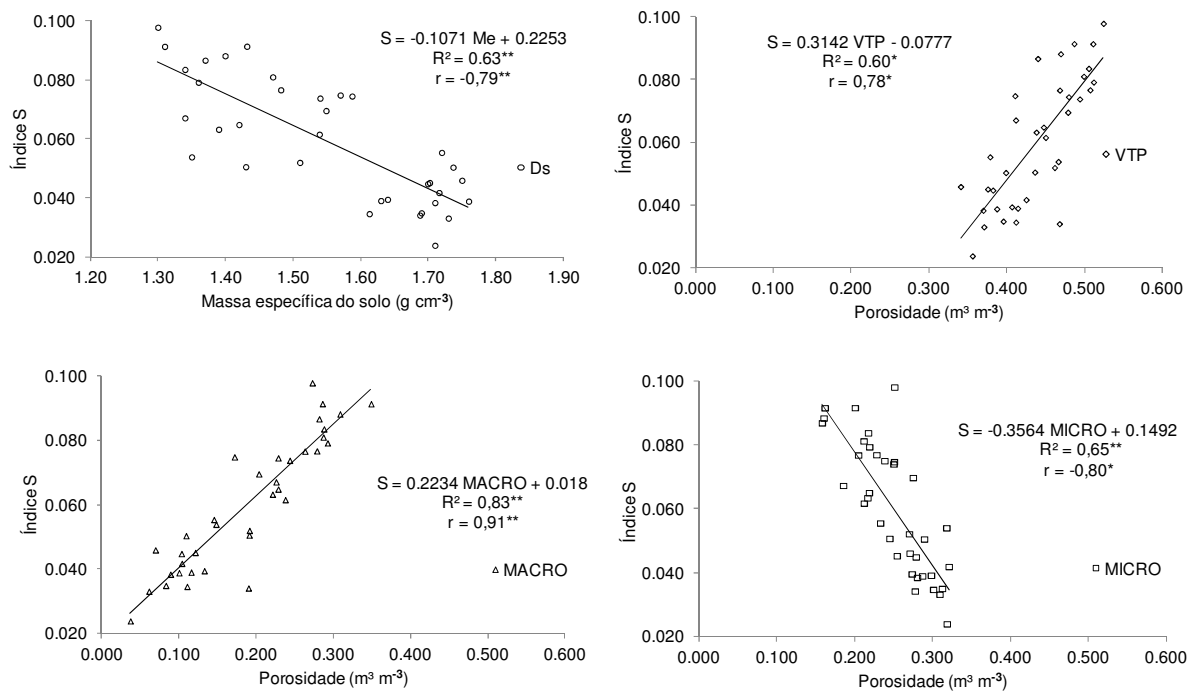


FIGURA 11. Correlação e regressão linear entre massa específica do solo (Me) (A), volume total de poros (VTP) (B), macroporosidade (MACRO) (C) e microporosidade (MICRO) (D) e índice S no P1. (r \*\* \*\* : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de t,  $R^2$  \*\* \* : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

A correlação entre Me e o índice S em P2 apresentou uma menor correlação ( $r = -0,50$ ) em relação à P1 e a MACRO apresentou uma correlação positiva, porém menor que apresentada na linha do cultivo (Figura 12).

Diferente do observado na linha de cultivo, todas as propriedades do solo exerceram pouca influência sobre o índice S, sendo que apenas 25% e 26% da variabilidade do índice S foi proporcionado pela Me e MICRO, respectivamente (Figura 12). Este comportamento está ligado ao fato do não revolvimento do solo pelo preparo, que em P1 alterou a estrutura do solo, interferindo na sua qualidade.

Esses resultados mostram que o revolvimento do solo alterou as condições físicas do solo, proporcionando uma melhoria no mesmo, diminuindo a massa específica do solo e aumentando a macroporosidade do solo até camada de 0,40 m.

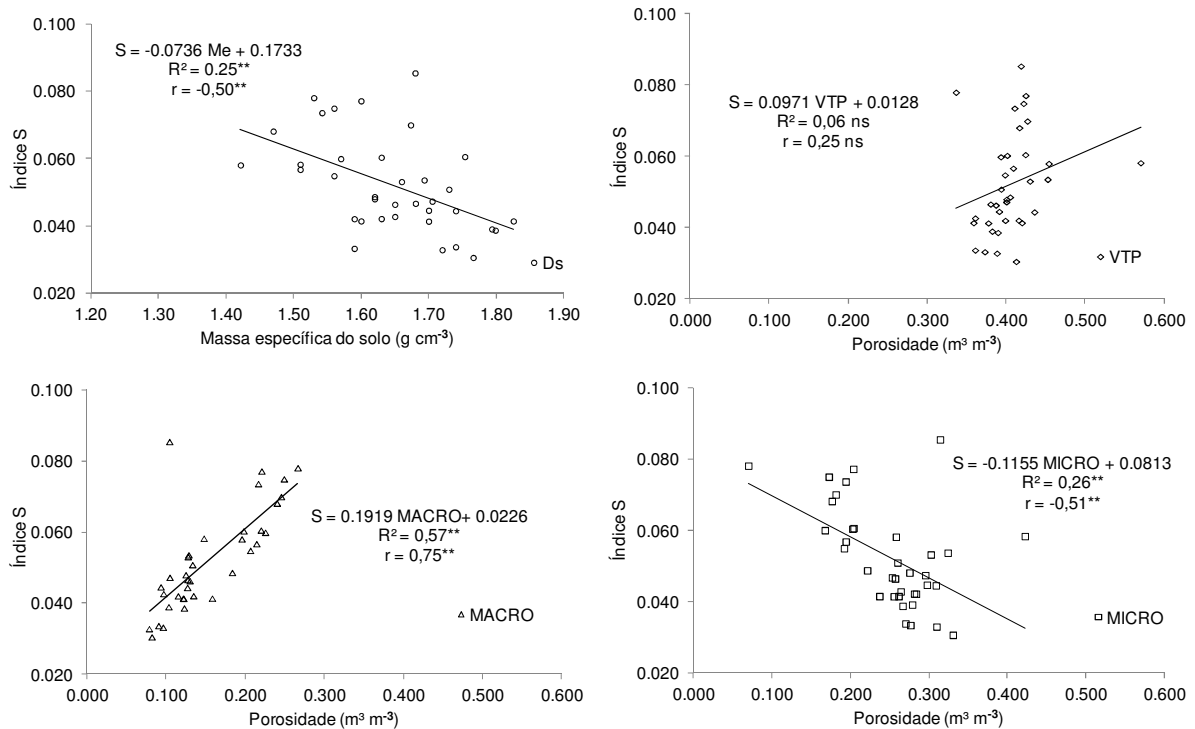


FIGURA 12. Correlação e regressão linear entre massa específica do solo (Me) (A), volume total de poros (VTP) (B), macroporosidade (MACRO) (C) e microporosidade (MICRO) (D) do solo e índice S no P2. ( $r^{**}$   $^{***}$ : Significativo a 1 e 5%, respectivamente pelo teste de t,  $R^2^{**}$   $^{***}$ : Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de F).

Como os resultados mostram que na linha de cultivo o índice S está relacionado com a porosidade do solo, esse fato evidencia a mudança na estrutura do solo ocasionada pela subsolagem, proporcionando como já citado, uma melhoria na disponibilidade de água no solo e nos atributos físicos do mesmo, principalmente na camada até 0,60 m.

Para o tipo de solo estudado e por meio das equações de regressão pode-se verificar que os valores de  $Me \geq 1,70 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $VTP \leq 0,388 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,  $MACRO \leq 0,091 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $MICRO \geq 0,294 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , para P1 e  $Me \geq 1,71 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $VTP \leq 0,394 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,  $MACRO \leq 0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $MICRO \geq 0,289 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para P2 nesse estudo, indica uma qualidade física do solo comprometida.

Com os resultados obtidos pode-se observar que o valor de macroporosidade ( $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) obtidos pela equação de regressão no P1 está correlacionado com  $S = 0,035$ , valor próximo ao proposto por Dexter (2004) como um solo pobre. Este valor de macroporosidade é considerado o limite prejudicial à produção agrícola. Com isso, mostra o bom ajuste da equação, como também a confiabilidade do índice S para determinação da qualidade do solo. O valor encontrado para MACRO é também o mesmo utilizado para indicação de qualidade física do solo, utilizando o conceito de Intervalo hídrico ótimo (IHO), conceito esse que além de integrar a curva de resistência à penetração, incorpora as variáveis relacionadas com o teor de água no solo e com a aeração, ou seja, integra os fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento das plantas, tendo como variável independente a massa específica do solo.

Perdas na qualidade do solo podem reduzir o intervalo hídrico do solo fazendo com que ocorra a necessidade do manejo correto da irrigação, por exemplo, aumentando a sua frequência em solos compactados.

## 5. CONCLUSÕES

1. A subsolagem alterou as propriedades físicas do solo com redução da massa específica do solo e aumento do volume total de poros na linha do cafeeiro, reduzindo também da resistência do solo à penetração;

2. A subsolagem proporcionou um equilíbrio entre a macro e microporosidade do solo até camada de 0,40 m do solo;

3. A subsolagem aumentou a disponibilidade de água no solo na camada de 0,00-0,60 m, em relação à entrelinha do cafeeiro;

4. A subsolagem proporcionou uma maior retenção de água em baixas tensões, como também o aumento da condutividade hidráulica do solo;

5. A maior disponibilidade de água em algumas profundidades foi relacionada ao teor de argila no solo, principalmente na camada de 0,60-0,80 m;

6. O efeito da subsolagem não variou para o fator tempo após preparo do solo estudado, indicando persistência das melhorias do solo obtidas com a subsolagem;

7. O índice S mostrou-se uma boa ferramenta para avaliar a qualidade do solo.

## 6. REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T.T.; INDA JUNIOR, A. V. Strength properties and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil Tillage Research**, v.105, n. 1 p.122-127, 2009.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.26, n.1, p.27-34, 2004.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MASCHIO, R.; SILVA, E. M. **Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório**. Embrapa Meio-Norte, 2007,2p. (Folder).

ARAÚJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. *In: Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros*, 2001, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123-142.

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

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. *In: Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America, p. 123-141, 1996.

BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; FREIRE, F. G. C.; SANTOS, W. O.; COSTA, F. G. B. Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do perímetro irrigado Gorutuba, em Janaúba-MG. **Revista Verde**, v.6, n.5, p.189-192, 2011.



BAVOSO, M. A.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n. 1, p.235-244, 2010.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3 p.681-691, 2010.

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, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.3, p.829-834, 2002.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1, p.167-177, 2001.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A; FIDALISKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.975-983, 2008.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n.2, p.331-336, 2011.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1989. 898p.

CANARACHE, A. Penetrometer: a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, v.16, n.1-2, p.51-70, 1990.

CANEVAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BEZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.4, p.997-1003, 1999.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERINO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.77-86, 2011.

CARVALHO, A. J. A.; SOUZA, E. H.; MARQUES, C. T. S.; GAMA, E. V. S.; NACIF, P. G. S. Caracterização física dos solos dos quintais agroflorestais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, Bahia. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n.2, p.941-944, 2007.

CASTRO, O. M.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; CANTARELLA, H. **Caracterização química e física de dois Latossolos em plantio direto e convencional**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. 23p. (Boletim Científico, 11).

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; ARVIDSSON, J.; TORMENA, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.3, p.477-485, 2009.

CHAVES, J. C. D. **Manejo do solo: adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira**. Londrina: IAPAR, 2002. 36p.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil: uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camada coesas nos solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 02, p. 77-80, 1997.

COELHO, E. F.; SANTOS, M. R.; COELHO FILHO, M. A. Distribuição de raízes do mamoeiro sob diferentes sistemas de irrigação localizada em Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 175-178, 2005.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C.; BERLADO, G. J. M.; MARCELO, A. V. Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.2, p.255-262, 2009.

CORRÊA, J. C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.20, n.11, p.1381-1387, 1985.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. L. S.; MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, p.1207-1216, 2011.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n. 2, p.235-244, 2009.

COSTA, A. M.; SOUZA, M. A. S.; SILVA JUNIOR, A. M.; FALQUETO, R. J.; BORGES, E. N. Influência da cobertura vegetal na densidade de três solos da Cerrado. In: **Anais**. II Simpósio Regional de Geografia. 2003.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: Biometria**. Viçosa: Editora UFV. . 2006.382p.

CUNHA, E. D. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.589-602, 2011.

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, 2004.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Science Agricola**, v.57, n.1, p. 191-192, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação dos solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 2006. p. 306.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. Soil Conservation service. Soil Survey Laboratory Methods and procedures for collecting soil samples: soil survey investigations. Washington, 1972.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n. 4, p.627-636, 2007.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.2, p.223-227, 2002.

GUARIZ, H. R.; CAMPANHARO, W. A.; PICOLI, M. H. S.; CECÍLIO, R. A.; HOLLANDA, M. P. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009. Natal, **Anais** ...Natal: INPE, 17p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York : Academic, 1980. 413 p.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego, Academic Press, 1982. 364p.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 140f Tese (Doutorado) Piracicaba: Escola Superior Luiz de Queiroz/USP, 2002..

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES - IJSN. Mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo. 2012, 19p.

JORGE, R. F.; ALMEIDA, C. X.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R. Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, v.28, Supplement1, p.159-169, 2012.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KILIÇ, K.; ÖZGÖZ, E.; AKBAÂ, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two uvents in Turkey. **Soil and Tillage Research**, v.76, n .2, p.1-11, 2004.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo – planta – atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba,1998.

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.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p.211-218, 1999.

LANI, J. A.; BRAGANÇA, S. M.; PREZOTTI, L. C.; MARTINS, A. G.; DADALTO, G. G. Preparo, manejo e conservação do solo. In: **Café Conilon** : Vitória, 2007, Cap. 10, p.281-293.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, v.78, n.2, p.151-170, 2004.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, J. F. W. F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos do sTabuleiros Costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.2, p. 473-486, 2010.

LI, L.; CHAN, K. Y.; NIU, Y.; OATES, A.; DEXTER, A. R; HUANG, G. Soil physical qualities in an Oxic Paleu stalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil and Tillage Research**, v.113, n.2, p.82-88, 2011.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: **Física do Solo**. Viçosa - MG: SBCS. 2012. Cap.3, p. 241-281.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho Distrófico Arênico. **Ciência Rural**, v.37, n. 4, p.1166-1169, 2007.

LOPES, E. S.; SAMPIETRO, J. A.; LOMBARDI, K. C.; DIAS, A. N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v.35, n.3, Edição Especial, p.659-667, 2011.

MACHADO, J. L; TORMENA, C. A; FIDALISKI, J; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.495-502, 2008.

MAGALHÃES, W. A.; CREMON, C.; MAPELI, N. C.; SILVA, W. M.; CARVALHO, J. M.; MOTA, M. S. Determinação da resistência do solo a penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. **Agrarian**, v.2, n.6, p.21-32, 2009.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; CAROLINO DE SÁ, M. A.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.873-882, 2007.

MEGDA, M. M.; CARVALHO, M. P.; VIEIRA, M. X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria- MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.781-788, 2008.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T.; REINERT, D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.3, p.315-321, 2010.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B. de; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.40, n.4, p.848-853, 2010.

MOREAU, A. M. S. S.; COSTA, L. M.; KER, J. C.; GOMES, F. H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do Tabuleiro Costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.6, p.1021-1030, 2006.

MORETI, D.; ALVES, M. C.; PEROZINI, A. C.; PAZ GONZÁLEZ, A.; SILVA, E. C. Condutividade hidráulica e resistência à penetração do solo influenciada por diferentes sistemas de manejo. **Cadernos Lab. Xeolóxico de LaxeCoruña**, v.31, n. 3, p.29-42, 2006.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, n.3, p.513-522, 1976.

NACIF, P. G. S.; REZENDE, J. O.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M.; COSTA, O. V. Efeitos da subsolagem em propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo Distrocoeso do estado da Bahia. **Magistra**, v.20, n.2, p.186-192, 2008.

NASCIMENTO, P. S.; BASSOI, L. H.; PAZ SILVA, V. P.; PEDRO VAZ, C. M.; NAIME, J. M.; MANIERI, J. M. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. **Irriga**, v.15, n.2, p.193-207, 2010.

NÓBREGA, N. E. F.; SILVA, J. G. F.; RAMOS, H. E. A.; PAGUNG, F. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática de Thornthwaite e Köppen para o município de São Mateus – ES. In: XVIII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. São Mateus – ES, 2008. Disponível em <[http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/arquivos\\_pdf/publicacoes/CONIRD/1569\\_sao\\_mateus.pdf](http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/arquivos_pdf/publicacoes/CONIRD/1569_sao_mateus.pdf)> Acesso em 02/11/2012.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.265-270, 2007.

PARENTE, H. N.; MAIA, M. O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos a com ênfase no semiárido. **Revista Trópica**, v.5, n.3, p.3-15, 2011.

PARTELLI, F. L., VIEIRA, H. D.; SANTIAGO; A. R.; BARROSO, D. G. Produção e desenvolvimento radicular de plantas de café 'Conilon' propagadas por sementes e por estacas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.949-954, 2006.

PELEGRINI, F.; MORENO, F.; MARTIN-MIRANDA, J.; CAMPOS, M. The influence of tillage methods is soil physical properties and water balance for a typical crop rotation SWS Spain. **Soil tillage Research**, v.16, n.2, p.345-358.1990.

PRANDO, M. B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A. P. E.; ROSOLEM, C. A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.693-700, 2010.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba : Discovery, 1996. 446p.

RAMIREZ-LÓPEZ, L.; SÁNCHEZ, A. R.; TAMAYO, J. H. C. Variabilidad espacial de atributos físicos de un typichaplustox de los llanos orientales de Colômbia. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.1, p.55-63, 2008.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E.S.; MULLER, F.; SILVA, E.M.; CARVALHO JUNIOR, O.A ; BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequencia across the Brazilian central platea. **Geoderma**, v.139, n.1-2, p.251-59, 2007.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2007.72p.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividades fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. 2000. 80p.

RENA, A. B.; DA MATTA, F. M. O Sistema radicular do cafeeiro: Morfologia e ecofisiologia. In: **O Estado da arte de tecnologias na produção de café**. Minas Gerais : Suprema Gráfica e Editora LTDA, 2002. Cap. 2, p.11-92.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. **Soil Science**, v.136, n.4, p.250-268, 1983.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA FREITAS, M. G. B.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

RIBEIRO, M. A. V.; NOVAIS, R. N.; FAQUIN, V.; FERREIRA, M. M.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M.; VILLANI, E. M. A. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1157-1164, 2010.

RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: **Methods of soil analysis**.. Madison, American Society for Testing and Materials, 1965. Part 1, 770p. (Agronomy, 9)

SCHEINOST, A; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, v.78, n.1-4, p.129-143, 1997.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; BOAS, M. A. V.; SAMPAIO, C.; JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.32, n.1, p.7-13, 2010.

SCHIAVO, J. A.; COLODRO, G. Agregação e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, v.71, n.3, p. 406-412, 2012.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, n.2, p.422-427, 1985.

SENRA, A. F.; LOUZADA, R. O.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, C. M. A.; VICTOR, D. M. Resistência à penetração em “Latosolo Vermelho” sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v.16, n.1, p.31-36, 2007.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T.; COSTA, J. C. 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.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da Qualidade Física do Solo. In: **Física do Solo**. Viçosa: SBCS, 2010. Cap. 7, p.241-281.

SILVA, A.P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S.; FIDALSKI, J.; NEVES JUNIOR, A. F. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.6. p.1-30, 2009.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; OLIVEIR, L. M. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, v.28, n.3, p.338-345, 2012.



SILVA, C. A. T.; MARIOTTO, T. C.; NÓBREGA, P. L. H. Porosidade de Latossolos e práticas de manejo agrícola para a conservação do solo. **Revista Varia Scientia Agrárias** v.2, n.2, p.153-164, 2012.

SILVA, E. M. D. A.; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.323-330, 2006.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.10, p.1487-1494, 2002.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos Em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p.27–36, 2012.

SILVA, J. U. C.; WENDLING, B.; CAMARGO, R.; PRAZERES MENDONÇA, L. B.; FREITAS, M. C. M. Análise comparativa ente os sistemas de preparo do solo: aspectos técnicos e econômicos. **Enciclopédia Biosfera**, v.7 n.12; p.1-11, 2011.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.9, p.2485-2492, 2000.

SILVA, M. M.; ALVES, M. C.; SOUSA, A. P.; FERNADES, C. S. Impacto do manejo nos atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho sob Cerrado, no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul. **Acta Science Agronomica**, v.28, n.1, p.1322, 2006.

SILVA, V. L. B.; MARTINS, P. F. S. Propriedades físicas do solo e sistema radicular do cafeeiro, variedade Conilon, sob diferentes espaçamentos. **Revista Ciência Agrária**, v.53, n.1, p.96-101, 2010.

SOIL MOISTURE EQUIPAMENT CORP. **Guelph Permeameter model 2800K 1 (operating instructions)**, Santa Bárbara, CA, 2005.

SOUZA, F. R. S.; JUNIOR, E. J. R. J.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; VENTUROSO, L. R.; ROSA, Y. B. C. J. Atributos físicos e desempenho agrônômico da cultura da soja em um Latossolo Vermelho Distroférrico submetido a dois sistemas de manejos. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, n.6, p.1357-1364, 2010.

SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; PAIVA, A. Q.; RODRIGUES, A. C. V.; RIBEIRO, L. S. Distribuição do sistema radicular de citros em uma topossequência de solos de Tabuleiro Costeiro do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.2, p. 503-513, 2008.

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, n.2, p.229-35, 1991.

STONE, L. F.; BALBINO, L. C.; CUNHA, E. Q. Índice S como indicador da qualidade física do solo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34, 2005, Canoas. **Resumos...** Canoas: Universidade Luterana do Brasil, 2005.

TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C. T. M.; OLIVEIRA, J. F.; ALMEIDA, E. Modelling of soil penetration resistance for an Oxisol under No-Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.89-95, 2012.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p.393-399, 1999.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.487-494, 2008.

TAYLOR, H. M. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: **Compaction of agricultural soils**. Madison, American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 292-305. (ASAE Monograph).

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n.1, p.18-22, 1966.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n.4, p. 301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P. D.; IMHOFF, S. D. C.; DEXTER, ANTHONY ROGER. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, v.65, n.1, p.56-60, 2008.

TORRES, E.; SARAIVA, O. D. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; SENE, G. A.; JAIME, D. G.; VIEIRA, D. M. S. Resistência à penetração em área de pastagem de capim Tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, v. 28, Supplement 1, p. 232-239, 2012.

TREVISAN, R.; SALEMI, L. F.; MORAES, J. M.; OLIVEIRA, J. C. M. Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório. **Irriga**, v.14, n.3, p.413-422, 2009.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, v.86, n. 5, p.759-766, 1994.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STURMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.969–977, 2012.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VENDRUSCOLO, J.; RIBEIRO, T. S.; MESQUITA, F. O.; ALVES, A. S.; SANTOS, G. A. Propriedades físicas de um Latossolo e Argissolo comparados a quatro tipos de solos na Paraíba – Brasil. **Revista Verde**, v.6, n.4, p.204-212, 2011.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.7, p.873-882, 1984.

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; JÚNIOR, R. N. A. Contribuição de material amorfo n gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência agrônômica**, v.43, n.4, p. 623-632, 2012.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n. 6, p.1271-1280, 2007.

VITÓRIA, E. L.; FERNANDES, H.C.; TEIXIERA, M. M.; CECON, P. R.; LACERDA, E.G. Correlação linear e espacial entre produtividade de *Brachiaria brizantha*, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.5, p.909-919, 2012.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

ZUFFO, V. J. **Efeitos de diferentes preparos nos atributos físicos do solo e no desempenho produtivo do mamoeiro Tainung 01**. 2012, 85f, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.