



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

SABRINE OLIVEIRA RIBEIRO

**PERMEABILIDADE RELATIVA DO SOLO AO AR COMO ÍNDICE DE QUALIDADE  
FÍSICA**

GUANAMBI  
BAHIA – BRASIL

2020



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

SABRINE OLIVEIRA RIBEIRO

**PERMEABILIDADE RELATIVA DO SOLO AO AR COMO ÍNDICE DE QUALIDADE  
FÍSICA**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional

GUANAMBI  
BAHIA – BRASIL

2020

Catálogo: Roberta Pinheiro Ferraz - CRB-5/1596, IF Baiano,  
Campus Guanambi

R484p Ribeiro, Sabine Oliveira

Permeabilidade relativa do solo ao ar como índice de  
qualidade física / Sabine Oliveira Ribeiro. – Guanambi, Ba,  
2020.:

Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal no  
Semiárido) – Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Baiano, Campus Guanambi, 2020.

Orientador(a): Alessandro dos Santos Brito.

1. Solo (pedologia), experimentos. 2. Permeabilidade.  
3. Curva de compactação. I. Título.

CDU: 631.42



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

SABRINE OLIVEIRA RIBEIRO

**PERMEABILIDADE RELATIVA DO SOLO AO AR COMO ÍNDICE DE  
QUALIDADE FÍSICA**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional

*Aprovada:*

## *AGRADECIMENTOS*

A Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia e socorro nas horas de angústia, a minha mãe Mara Santos Oliveira, minhas irmãs, Karla Viviane Oliveira Ribeiro e Débora Beatriz O. Ribeiro, minha sobrinha Aurora Oliveira Barros e a luz da minha vida, minha filha Laura Oliveira Carvalho pelo grande apoio, incentivo e maior fonte de alegria, vocês são meu porto seguro.

Ao orientador D.Sc. Alexsandro dos Santos Brito, que antes de tudo me mostrou que é um grande ser humano, através da paciência e compreensão nos momentos em que mais precisei, grata pela dedicação e ensinamentos que levarei comigo.

As minhas amigas Jéssica, Silvana, Poliana e Iara, que foram minhas confidentes, emprestaram seus ouvidos e me arrancaram sorrisos.

Aos colegas Danilo Castro, Darley Araújo, Marcelo Couto, Aryelle e Mariano por toda ajuda com a execução deste trabalho, obrigada de coração.

As laboratoristas Flávia, Simone e Yslai pela ajuda, amizade, cafés e campanha nas tardes de trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Baiano - Campus Guanambi e todos os professores do Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, por todo apoio durante o curso.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal no Semiárido.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>8</b>
2.1 Permeabilidade do solo ao ar .....	8
2.2 Porosidade do Solo .....	9
2.3 Densidade do Solo e Resistência à Penetração .....	10
2.4 Curva de Compactação e Resistência À Penetração do Solo .....	11
<b>3.MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>12</b>
3.1 Localização do Experimento .....	12
3.2 Distribuição do tamanho das partículas .....	12
3.3 Densidade do solo .....	13
3.4 Determinação da Porosidade.....	13
3.5 RESISTÊNCIA à Penetração.....	15
3.6 Gradiente de umidade do solo para Ensaio de Proctor .....	15
3.7 Permeabilidade do solo ao ar .....	16
3.8 Permeabilidade relativa do solo ao ar .....	18
3.9 análise dos Dados.....	18
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>27</b>

## RESUMO

Ao longo do tempo, várias metodologias foram propostas afim de avaliar os atributos físicos do solo de maneira mais simplificada e menos onerosa. A permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e a permeabilidade relativa do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) na pior condição física, apresentam-se como índices eficientes na distinção da qualidade física de solos. A  $K_a$  pode indicar problemas estruturais no solo nos diferentes tipos de manejo, enquanto a  $K_{ar}$ , que é calculada pela razão entre a permeabilidade ao ar na pior condição física e a permeabilidade ao ar atual, permite maior eficiência e praticidade na interpretação da qualidade física do solo, identificando o melhor manejo para incremento da produtividade. Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência da permeabilidade relativa do solo ao ar como índice de qualidade física, tomando por base alguns solos da região semiárida do Estado da Bahia. Para a determinação da  $K_{ar}$  do Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico, foram utilizadas amostras deformadas e indeformadas. O delineamento experimental foi inteiramente aleatorizado, com 6 tratamentos (T1 – Latossolo Vermelho Amarelo 0-0,1 m; T2 – Latossolo Vermelho Amarelo 0,1-0,2 m; T3 – Cambissolo Háplico 0-0,1 m; T4 – Cambissolo Háplico 0,1-0,2 m; T5 Latossolo Vermelho 0-0,1 m e T6 – Latossolo Vermelho 0,1-0,2 m) e dez repetições. A  $K_{ar}$  para o Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho, para as camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m e para as duas tensões (6 e 10 kPa), foram acima de 0,9 revelando um solo degradado, devido à falta de manejo adequado nessas áreas. Por sua vez o Cambissolo Háplico obteve valores abaixo de 0,25, mostrando um solo com melhor condição física.

**Palavras-Chave: Curva de compactação, Compactação, Permeabilidade**

## ABSTRACT

Over time, several methodologies have been proposed in order to assess the physical attributes of the soil in a more simplified and less costly way. The permeability to air ( $K_a$ ) and the relative permeability of soil to air ( $K_{ar}$ ) in the worst physical condition, are presented as efficient indices in distinguishing the physical quality of soils.  $K_a$  can indicate structural problems in the soil in different types of management, while  $K_{ar}$ , which is calculated by the ratio between air permeability in the worst physical condition and current air permeability, allows greater efficiency and practicality in the interpretation of the physical quality of the soil, identifying the best management to increase of yield. This work aims to evaluate the efficiency of the relative permeability of soil to air as an index of physical quality, based on some soils present in the territory of the municipality of Guanambi and region. For the determination of  $K_{ar}$  of Latosol Vermelho Amarelo, Latosol Vermelho and Cambisol Háplico, deformed and undisturbed samples were used. The experimental design was entirely randomized, with 6 treatments (T1 - Red Yellow Latosol 0-0.1 m; T2 - Red Yellow Latosol 0.1-0.2 m; T3 - Haplissol 0-0.1 m; T4 - Cambisol Háplico 0.1-0.2 m) and (T5 Latosol Red Yellow 0-0.1 m; T6 - Latosol Red Yellow 0.1-0.2 m) with ten repetitions.  $K_{ar}$  for Latosol Red Yellow and Latosol Red, for layers 0-0.1 and 0.1-0.2 m and for both stresses (6 and 10 kPa), were above 0.9 revealing a degraded soil, due to the lack of proper management in these areas. In turn, Cambisol Háplico obtained values below 0.25, showing a soil with better physical condition.

**Keywords :** Compaction curve, Compaction, Permeability

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por índices de qualidade e a determinação de atributos do solo de mais fácil obtenção (menor custo e tempo) e que englobem, em seus princípios, os modelos físicos que



podem retratar a complexidade do solo e as modificações impostas pelos manejos agrícolas, tem sido uma das funções das pesquisas realizadas em Física do Solo nas últimas décadas.

Nesse sentido, os atributos e processos físicos do solo relacionados com os aspectos estruturais têm se destacado, em virtude da dinâmica que os caracterizam dentro dos agrossistemas, tendo a ação antrópica como principal agente modificador do estado físico do solo.

Efeitos negativos nos atributos do solo, como aumento da densidade, redução da porosidade e resistência à penetração, são frequentes no sistema de manejo convencional, prejudicando o desenvolvimento das culturas (VASCONCELOS et al., 2013). A ocorrência frequente de processos de degradação exige a atuação conjunta dos setores científico e produtivo, a fim de realizar pesquisas científicas com o objetivo de encontrar soluções metodológicas que possibilitem um diagnóstico preciso e rápido dos impactos que possam acontecer na implantação dos sistemas agrícolas, além de um monitoramento constante da qualidade física dos solos.

Portanto, a medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar, a qual será denominada apenas de permeabilidade do solo ao ar ( $ka$ ), pode ser uma dessas formas de acessar a qualidade física do solo, por indicar problemas estruturais, uma vez que é interpretada como a área livre para a circulação de ar no espaço poroso. A importância da quantificação da permeabilidade do solo ao ar deve-se, por exemplo, à necessidade de se caracterizar o espaço poroso e de se identificar mudanças na estrutura do solo, ocasionadas pelas práticas de manejo (BLACKWELL et al., 1990; CAVALIERI et al., 2009, JESUS et al., 2017).

Esse trabalho tem por objetivo a validação e o detalhamento de um índice de qualidade física, denominado permeabilidade relativa do solo ao ar ( $kar$ ) (CARVALHO et al., 2019), que possibilite uma distinção mais eficiente da qualidade física de alguns solos da região.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR**

A ( $K_a$ ) é uma medida que descreve a habilidade do meio em prover a troca de gases entre o solo e a atmosfera, em resposta a um gradiente de pressão (RODRIGUES; 2009; GUEDES FILHO et al; 2015; ALAM 2015; JESUS et al., 2017). Existem vários métodos para se aferir a  $K_a$ . Kirkham (1946) propôs o primeiro aparato e o método para medição da  $K_a$  pelo método da pressão decrescente.

Alguns autores utilizaram o método proposto por Kirkham (1946) em seus trabalhos, como Whelan et al. (1995) e McKenzie & Dexter (1996). No entanto, muitas metodologias ficaram obsoletas devido a inviabilidade e dificuldade apresentadas, outras foram aprimoradas, de forma a propiciar praticidade e maior confiabilidade nas análises, tanto em medidas realizadas in situ quanto em laboratório. A determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas pelo método da pressão decrescente é um método eficiente (SILVA et al., 2009). Ainda há carência de informações acerca da  $K_a$ , por razões ligadas aos métodos de medida e também da baixa disponibilidade de equipamentos (SILVA et al., 2009). Então, faz-se necessária uma metodologia uniforme, que garanta mais amplamente a difusão destes estudos.

O incremento tecnológico, sobretudo na construção de sensores (especificamente microcontroladores e sensores de pressão) foi um aliado na evolução para a estimativa da  $K_a$ , a exemplo do equipamento proposto por Neves et al. (2004) e Silveira et al. (2011), os quais utilizaram a tecnologia para desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados com um transdutor de pressão diferencial.

Com a contínua necessidade de facilitar cada vez mais as análises, a fim de serem cada vez mais precisas e confiáveis, Silveira et al. (2011) desenvolveram um sistema de aquisição de dados para permeâmetro de carga decrescente, que possibilitasse a determinação da  $K_a$ , utilizando uma câmara de desumidificação para padronização do ar utilizado na análise, e um conjunto de sensores de temperatura e umidade relativa para estimativa da massa de água removida durante o processo de medição. Para tanto, desenvolveu-se um método de medição para esse objetivo. Além disso, utilizaram sensor de pressão diferencial e microcontrolador, que permitiram maior precisão na determinação de  $K_a$ .

## 2.2 POROSIDADE DO SOLO

A porosidade do solo está vinculada a atributos como densidade e resistência à penetração, que estão diretamente relacionados com o desenvolvimento das culturas.

Um sistema poroso, com boa distribuição de tamanho de poros, é responsável pela armazenagem da água no solo, para as raízes das plantas, e condução da água no solo até os lençóis freáticos, além de oferecer condições para a respiração dos microrganismos e das raízes. Características do espaço poroso, como volume, tamanho, forma e sua distribuição, podem ser usados para estimar alguns atributos do solo, uma vez que a qualidade do espaço poroso afeta o movimento do ar e da água no meio (RODRIGUES et al., 2011).

Nesse aspecto, a distribuição de poros é muito importante. Dependendo da distribuição dos vários tipos de poros do solo, a água e o ar podem se movimentar com maior ou menor facilidade, sendo que a porosidade de aeração crítica é de 10%. Quando abaixo desse valor, a difusão dos gases no solo passa ser muito reduzida, afetando diretamente a aeração do solo e as plantas.

A porosidade do solo pode ser classificada em duas partes: porosidade textural; e estrutural. A porosidade estrutural é composta por rachaduras, microfissuras, bioporos e macroagregados. A porosidade textural é compreendida entre as partículas primárias do solo. A primeira é fortemente afetada por atividade antrópicas como preparo de solo e compactação. A segunda, por sua vez, sofre pouco efeito do manejo de solo sobre suas características (DEXTER, 2004).

### 2.3 DENSIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

A densidade do solo ( $D_s$ ) é um importante atributo físico, mas sua utilidade vai muito além, pois, a partir dela, pode-se inferir muito sobre o estado e a qualidade do solo, por estar ligada à porosidade, à armazenagem de água e às trocas gasosas no solo. A densidade tende a aumentar conforme a profundidade, devido alguns fatores como: reduzida quantidade de matéria orgânica, eluviação de argila, menor agregação e pressão mecânica exercida sobre a superfície do solo, dentre outros.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é um importante indicador da qualidade física dos solos cultivados e um atributo físico que tem efeito direto na fisiologia vegetal, podendo chegar a limites prejudiciais às plantas onde há impedimento mecânico ao crescimento das raízes. Quando alcança valores maiores que 2 MPa passa a limitar o desenvolvimento radicular e está relacionada com redução da porosidade de aeração, configurando um estado físico denominado de compactação. A constatação desse estado físico com maior frequência no setor produtivo é devido à difusão do uso do penetrógrafo no meio

agrícola, já que este é de fácil utilização e obtenção de dados, diagnosticando a resistência do solo à penetração das raízes e também na detecção de camadas compactadas (MOREIRA et al., 2014).

Igualmente à resistência à penetração, a densidade é amplamente utilizada para avaliação da compactação, que representa um dos principais problemas para a agricultura, por limitar o crescimento das plantas. Para um bom desenvolvimento da planta, a porosidade de aeração necessita ser de, no mínimo, 10% da porosidade total (GUEDES FILHO et al., 2015). Valores da densidade associada à compactação de restrição para o crescimento radicular são iguais a  $1.650 \text{ kg m}^{-3}$  para solos arenosos e a  $1.450 \text{ kg m}^{-3}$  para solos argilosos (REINERT & REICHERT, 2006).

#### 2.4 CURVA DE COMPACTAÇÃO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO

Com os dados obtidos a partir do ensaio de compactação, é gerada a curva de compactação, que consiste numa regressão polinomial de segunda ordem entre a densidade da amostra de solo compactada e o respectivo conteúdo de água da amostra. Na curva de compactação são encontrados, geralmente, os pontos ascendentes e descendentes. O primeiro é denominado ramo seco e o segundo ramo úmido. Esses ramos são unidos por uma função parabólica, a qual define uma densidade máxima de compactação que corresponde a uma umidade ótima para compactação. No ramo seco, a umidade é baixa e há a ação da capilaridade. No ramo úmido a água mais abundante se encontra livre no solo, atenuando boa parte da fração de energia de compactação e, independente da classe de solo, as curvas de compactação se assemelham quanto à forma.

A umidade exerce grande influência na compactação e fica próxima a capacidade de campo (Mantovani, 1986). À medida que se aumenta a energia aplicada, a quantidade de água para obter essa máxima compactação diminui, sendo critério de alerta importante na utilização de maquinários pesados, já que, na agricultura, a energia de compactação representa equivalente a uma pressão de 140 kPa em solo franco-arenoso (RAGHAVAN et al., 1976). Busscher et al. (1997) demonstraram a utilização de funções matemáticas para descrever a RP em uma função não-linear da  $D_s$  e da  $\theta$  do solo, gerando a curva de resistência do solo à penetração (CRS). A CRS pode ser determinada em amostras indeformadas ou diretamente no campo, obtendo-se medidas da RP a partir do secamento de um solo em distintos valores de  $D_s$ .

Desta forma, na quantificação e descrição da CRS são incorporados diferentes fatores associados com a degradação física do solo, permitindo estabelecer os valores críticos de  $D_s$  ou de  $\theta$  associados com valores limitantes de RP (BLAINSKI et al., 2008). É importante a determinação da curva de resistência do solo nos estudos dos efeitos da compactação sobre as condições físicas, podendo ser utilizada como ferramenta de manejo (IMHOFF et al., 2000).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram avaliados três solos da região semiárida: Latossolo Vermelho, presente no setor de agricultura do IFBAIANO/*Campus* Bom Jesus da Lapa, utilizado para cultivo de fruteiras e capins; Cambissolo Háplico, utilizado para o cultivo de milho no município de Iuiú; e um Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico, presente em uma pequena propriedade rural, próxima ao IFBAIANO/*Campus* Guanambi, cultivado anteriormente com algodão e, atualmente, com pastagem. De cada uma das duas camadas avaliadas (0-0,1 e 0,1-0,2 m) foram retiradas dez amostras para os diferentes tipos de solo. As análises, realizadas no Laboratório de Física do Solo do IFBAIANO/*Campus* Guanambi, constaram de distribuição do tamanho de partículas, densidade do solo, determinação da porosidade, resistência à penetração e permeabilidade do solo ao ar e permeabilidade relativa do solo ao ar.

#### 3.2 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

As análises granulométricas foram realizadas utilizando o método da pipeta (GEE e OR, 2002), sendo que a solução dispersante foi uma mistura das soluções de hidróxido de sódio ( $4 \text{ g L}^{-1}$ ) e de hexametáfosfato de sódio ( $10 \text{ g L}^{-1}$ ), conforme metodologia do IAC (CAMARGO et al., 1986, JESUS et al., 2017). Foram utilizados 40 g de solo, 250 mL de água destilada e 100 mL da solução dispersante.

Com as proporções de areia e argila foi possível calcular, por diferença, a proporção de silte e, finalmente, proceder à classificação textural do solo, conforme as recomendações do Soil Survey Staff (2010).

### 3.3 DENSIDADE DO SOLO

Determinou-se a densidade do solo pelo método do cilindro volumétrico para os pontos amostrais, utilizando um extrator tipo Uhland, com cilindros volumétricos cujas alturas e diâmetros foram previamente medidos, em três repetições, utilizando um paquímetro digital. No laboratório, as amostras foram preparadas, sendo removido o excesso de solo do cilindro e fixando um recorte de papel mata-borrão na base da amostra para evitar perda de material. Depois de analisadas a permeabilidade nas duas tensões desejadas e feita a análise de resistência à penetração, as amostras foram colocadas em estufa (105°C, por 24 horas), e pesadas para determinação da massa de solo seco e, posteriormente, da densidade do solo, dividindo-se a massa do solo seco pelo volume médio do cilindro. Devido à textura e a outros atributos físicos do solo, têm-se buscado a normalização dos limites de Ds, utilizando a densidade relativa do solo (KLEIN.,2008). A densidade relativa (DR) é a razão entre a densidade máxima de compactação, obtida pelo ensaio de Proctor, e a densidade do solo em seu estado natural (MARCOLIN & KLEIN, 2011).

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE

A porosidade total do solo foi determinada por meio das amostras com estrutura indeformada. Para isso, foi utilizado o método do funil de Haines (BRITO et al., 2009). Inicialmente, coletou-se amostras de solo com estrutura indeformada, com volume igual ao volume dos cilindros. Em seguida, colou-se um recorte de papel mata-borrão na base de cada cilindro, com diâmetro igual ao do cilindro, evitando-se, assim, a perda de solo e um perfeito contato da amostra com a placa porosa do funil de Haines (BRITO et al., 2011). Após esse preparo, as amostras foram dispostas em uma bandeja, que foi preenchida, gradativamente, com água deionizada, até atingir  $\frac{3}{4}$  da altura dos cilindros, sendo assim saturadas por 24 horas, expulsando todo o ar presente nos poros.

As amostras de solo, já saturadas, foram pesadas em balança de precisão e transferidas para o funil de Haines. Inicialmente, foi aplicada em cada amostra uma tensão de 6,0 kPa até estabilização da umidade das amostras. As amostras foram então pesadas. Em seguida, foram

analisadas no permeâmetro (aparelho para determinação da  $K_a$ ) e colocadas novamente no funil de Haines, sendo aplicada então uma tensão de 10 kPa e novamente pesadas após estarem estabilizadas. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa, à 105 C, por 24 h, para obtenção do peso seco do solo e determinação das umidades das amostras em cada tensão aplicada e da densidade do solo.

A porosidade total foi obtida pela relação entre  $\rho$  e  $\rho_s$  Equação 1.

$$\alpha = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (1)$$

Em que  $\rho$  é a densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e  $\rho_s$  a densidade de partículas ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

A umidade a base de massa,  $U$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ), foi obtida por meio da Equação 2:

$$U = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (2)$$

Em que  $M_{su}$  é a massa do solo úmido em cada potencial específico (kg) e  $M_{ss}$ , a massa de sólidos do solo (kg).

O conteúdo de água no solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi determinado por meio da Equação 3:

$$\theta = U \times \frac{\rho}{\rho_a} \quad (3)$$

sendo  $U$  a umidade a base de massa ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e  $\rho_a$  a densidade da água ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

A porcentagem de macroporos ( $Ma$ ), mesoporos ( $Me$ ) e microporos ( $Mi$ ) foram obtidas por meio das Equações (4) e (5), respectivamente:

$$Ma = (\theta_0 - \theta_{6kPa}) \times 100 \quad (4)$$

$$Mi = (\theta_{6kPa}) \times 100 \quad (5)$$

em que  $\theta_0$  é a umidade a base de volume do solo saturado ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ),  $\theta_{6kPa}$  é a umidade a base de volume da amostra estabilizada na tensão 6 kPa.

### 3.5 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

A resistência do solo à penetração radicular foi determinada logo após a realização das leituras de permeabilidade ao ar das amostras, estando essas ainda úmidas, estabilizadas na tensão de 10 kPa. O penetrógrafo de bancada utilizado foi o constituído por um dinamômetro (IMPAC) instalado em um suporte de bancada, com dispositivo de movimentação manual. Foi tomado um ponto central nas amostras para medida de resistência. Os dados gravados em um cartão de memória e, em seguida, foram exportados para uma planilha eletrônica.

Para a seleção das medições mais precisas para a promoção de uma média representativa da resistência do solo à penetração radicular, fez-se, primeiro, uma análise estatística descritiva das leituras efetuadas pelo penetrógrafo, por amostra. Em seguida foi selecionado o maior valor de resistência da amostra e, deste subtraído 75% do desvio padrão. O valor encontrado foi o extremo inferior ( $LI = RP - 0,75 * DP$ ). Com os limites superior e inferior definidos, o conjunto de dados contido neste intervalo foi selecionado para formar uma média fiel do atributo e transformado em resistência à penetração, através da Equação 6 baseada na Equação de Stolf (STOLF. 1991).

$$RP = \frac{R * 9,80665}{12,5664} \quad (6)$$

Em que, RP é a Resistência a penetração do solo em (MPa), R são os valores de Resistência da amostra em (kgf). Os dados de resistência à penetração foram ajustados em relação a umidade volumétrica (q) e a densidade do solo (Ds) utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1997):

$$RP = a D_s^b \theta^c \quad (7)$$

Em que, RP é a resistência à penetração (em MPa),  $\theta$  que é o conteúdo de água do solo (em  $m^3 m^{-3}$ ), Ds é a densidade do solo (em  $kg m^{-3}$ ). Os coeficientes a, b e c são os parâmetros do modelo obtidos mediante ajustes não-lineares

### 3.6 GRADIENTE DE UMIDADE DO SOLO PARA ENSAIO DE PROCTOR

Primeiramente, a amostra de solo deformada foi seca ao ar por um período que variava de um a sete dias, sendo destorroada e peneirada em peneira de malha de 4 mm. Para a



determinação da umidade gravimétrica inicial, obteve-se a massa de três cadinhos, nos quais foram colocados cerca de 15 gramas de solo, que foram pesados novamente para obtenção da massa de solo úmido. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa para secagem por 24 horas e, então retiradas e pesadas para determinação da massa de solo seco e umidade do solo. Os dados foram inseridos em uma planilha eletrônica, resultando na umidade inicial calculada pela diferença entre a massa do solo úmido e solo seco e a massa do solo seco e o recipiente.

Com base em conhecimentos prévios acerca do solo amostrado (textura, tipo de solo, manejo adotado) foi arbitrado um valor e este multiplicado pela umidade inicial e, então, com esse valor calculado pela Equação 8, foram determinados os volumes de água para cada amostra, totalizando cinco gradientes de umidade. Por fim, foi calculada a média dos três valores obtidos, resultando na umidade média desejada para cada gradiente. O solo seco foi disposto em uma bandeja e, com o auxílio de um borrifador, a quantidade de água desejada foi aplicada. O solo úmido foi revolvido com um garfo e, ao término, disposto em saco plástico transparente por um período de 24 horas, para a uniformização da umidade. Para o ensaio de compactação, a amostra de solo foi dividida em três partes e um terço do solo foi colocado no cilindro. Com o soquete, foram deferidos 26 golpes. O mesmo procedimento foi feito para os outros 2/3 de solo restantes. Então, foram coletadas subamostras de solo com auxílio de uma prensa hidráulica, utilizando-se cilindros volumétricos com mesmas dimensões daqueles utilizados para determinação da permeabilidade.

$$UD = \frac{(2500*(ugd1-ugi))}{1+ugi}, \quad (8)$$

em que UD é a umidade desejada em (ml), 2500 é a quantidade de solo padronizada para o ensaio de Proctor Normal (gr); ugd1 é a umidade gravimétrica desejada (gr); ugi é a umidade gravimétrica inicial (gr).

### 3.7 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR

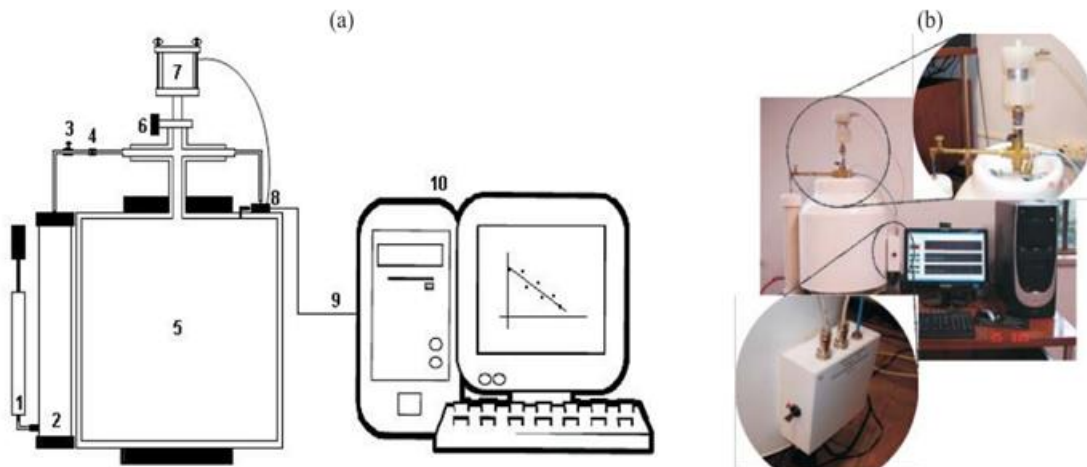
Para determinar a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ), foi utilizado o método da pressão decrescente, desenvolvido por Kirkham (1946), utilizando amostras com estrutura indeformada. O princípio do método baseia-se na quantificação do decréscimo da pressão no reservatório de ar em função do tempo, o qual é proporcional ao fluxo de ar que atravessa a amostra de solo (SILVA et al., 2009; SILVEIRA et al., 2011; JESUS et al., 2017).

Para determinar a  $K_a$ , foram utilizadas as amostras de solo indeformada, com umidades estabilizadas na tensão de 10 kPa. As amostras de solo foram fixadas no permeâmetro (Figura 1), utilizando a fita Silver Tape®. O ar foi bombeado para o interior de um cilindro de ar, com volume de 0,03135 m<sup>3</sup>, até atingir pressão de 1,0 kPa. Iniciou-se o processo de determinação da permeabilidade do solo ao ar, abrindo-se a válvula do equipamento e ligando-se o registro das leituras simultaneamente. A  $K_a$  (μm<sup>2</sup>) foi calculada por meio da Equação 9:

$$K_a = \left( \frac{2,3 L \mu V}{A P a} \right) x |S|, \quad (9)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica do ar (18,1 x 10<sup>-6</sup> kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> a 20 °C);  $V$ , o volume do reservatório utilizado (0,01455 m<sup>3</sup>);  $Pa$ , a pressão do ar atmosférico (101.325 Pa a 20 °C);  $L$ , o comprimento da amostra (m);  $A$ , a área da amostra (m<sup>2</sup>); e  $S$ , o módulo da declividade da equação da reta definida entre as variáveis pressão ( $P$ ) e Log do tempo ( $t$ ) (SILVA et al., 2009; SILVEIRA et al., 2011).

As leituras da pressão do ar no interior do cilindro do permeâmetro foram registradas em função do tempo. Os dados foram exportados para a planilha Excel, usando a interface do próprio sistema de aquisição *PermeAR v.1.0* (SILVEIRA et al., 2011).



**Figura 1.** Diagrama esquemático (A) constituído por: 1 – bomba de ar; 2 – cilindro de desumidificação do ar, preenchido com sílica gel; 3 – válvula de controle de fluxo; 4 – válvula de escape para ajuste fino da pressão interna; 5 – cilindro de ar; 6 – válvula de controle de fluxo; 7 – compartimento de alocação da amostra indeformada de solo; 8 – sistema de aquisição de dados constituído por transdutor de pressão e sensores de temperatura e umidade; 9 – cabo de transmissão de dados (DB 9); 10 – microcomputador para processamento dos dados; e (B)

fotografia do equipamento para medida da permeabilidade do solo ao ar (SILVEIRA et al., 2011).

### 3.8 PERMEABILIDADE RELATIVA DO SOLO AO AR

A permeabilidade relativa do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) foi tomada em amostras de solo na pior condição física. Para tanto, foram coletadas amostras de solo, com estrutura deformada, nas mesmas áreas de coleta das amostras de solo com estrutura indeformadas, utilizadas para a determinação da permeabilidade do solo ao ar, porosidade, densidade e resistência à penetração do solo, para a realização do ensaio de Proctor normal (KLEIN, A.V.; MADALOSSO, T.; BASEGGIO, M., 2013), o qual conduz o solo à máxima compactação. Nas amostras com densidades do solo máximas, foram coletadas sub-amostras de solo com auxílio de uma prensa hidráulica, utilizando dois cilindros volumétricos de aproximadamente 0,05 m de diâmetro, acoplados por meio de fita tipo Silver Tape<sup>®</sup>.

Essas amostras foram saturadas e equilibradas nas tensões de 6 e 10 kPa. Após o equilíbrio, foram pesadas e acopladas ao permeâmetro, onde determinou-se a permeabilidade ao ar do solo compactado ( $K_{ac}$ ). Após a determinação da permeabilidade na pior condição física, as amostras foram analisadas no penetrógrafo e levadas a estufa para secagem (105 °C por 24 h) para obtenção da densidade do solo nesse estado. Com as permeabilidades ao ar determinadas para duas condições físicas (atual e de solo compactado), foram calculadas a permeabilidade ao ar relativa pela Equação 10 abaixo:

$$K_{ar} = \frac{K_{ac}}{K_a} \quad (10)$$

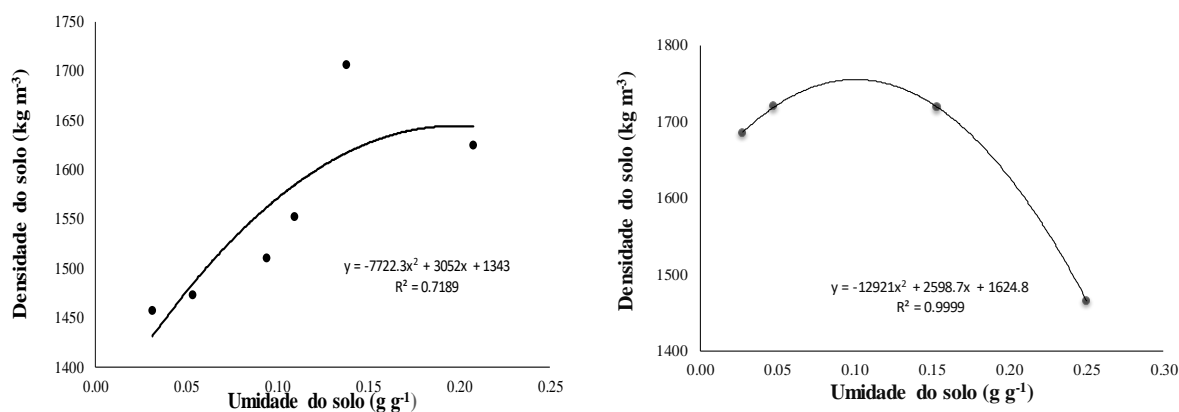
### 3.9 ANÁLISE DOS DADOS

O delineamento experimental foi o inteiramente aleatorizado, com 6 tratamentos (T1 – Latossolo Vermelho Amarelo na camada de 0-0,1 m; T2 – Latossolo Vermelho Amarelo na camada 0,1-0,2 m; T3 – Cambissolo Háplico na camada de 0-0,1 m; T4 – Cambissolo Háplico na camada de 0,1-0,2 m) e (T5 Latossolo Vermelho na camada de 0-0,1 m; T6 – Latossolo Vermelho na camada 0,1-0,2 m), com dez repetições, totalizando 60 amostras de solo com estrutura indeformada e mais 30 amostras de solo com estrutura deformada. Os dados coletados

foram analisados com auxílio do programa R para análise, pacote Agricolae. A normalidade dos dados de  $K_a$  foi verificada com o teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965), e a distribuição dos dados de  $K_{ar}$ , para a tensão de 10 kPa, foi encontrada como sendo não paramétrica, sendo submetida à análise não paramétrica de Kruskal-Wallis (1952).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se nas curvas de compactação para o LV que a máxima densidade do solo (teste de Proctor normal) foi de 1690,21 kg m<sup>-3</sup> para a camada 0-0,1 m (Figura 2). Já para a camada 0,1-0,2 m, a máxima densidade foi de 1754,56 kg m<sup>-3</sup>. Sendo assim, a máxima densidade na segunda camada é maior que a máxima densidade encontrada para a camada de 0-0,1 m. Este fato é explicado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA,2018), o Latossolo Vermelho Distrófico, solo predominante em Bom Jesus da Lapa, apresenta grande quantidade de frações de argila e areia fina na sua composição (Tabela 1), sobretudo nas camadas inferiores do solo. A fração areia tende a se combinar com a fração argila que possui caráter cimentante formando agregados, o que pode levar a formação de camadas compactadas (MACEDO; SILVA; CABEDA, 2010).



**Figura 2.** Curvas de compactação para o Latossolo Vermelho na camada de 0-0,1 m (A) e 0,1-0,2 m (B).

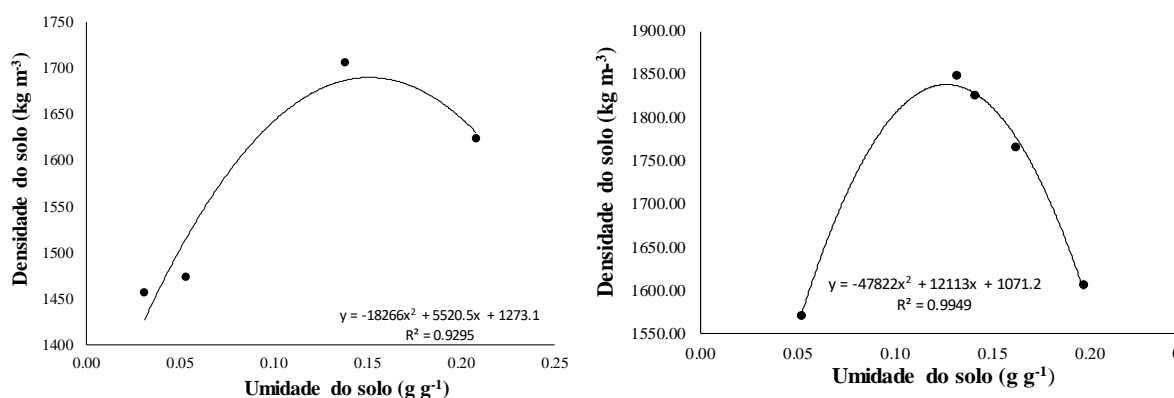
**Tabela 1.** Composição Granulométrica e Classe textural do solo para três localidades da região.

Identificação*	Composição granulométrica (%)			Classe Textural
	Areia	Silte	Argila	

<b>LVA 1</b>	64	20	16	Franco Arenoso
<b>LVA 2</b>	66	18	16	Franco Arenoso
<b>CBS 1</b>	11	38	51	Argiloso
<b>CBS 2</b>	9	24	67	Muito argiloso
<b>LV 1</b>	59	19	22	Franco-Argilo Arenosa
<b>LV 2</b>	56	8	36	Argilo Arenosa

\* LVA, CBS e LV são Latossolo vermelho amarelo, Cambissolo e Latossolo vermelho, respectivamente, e a numeração 1 e 2 referem-se às camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente

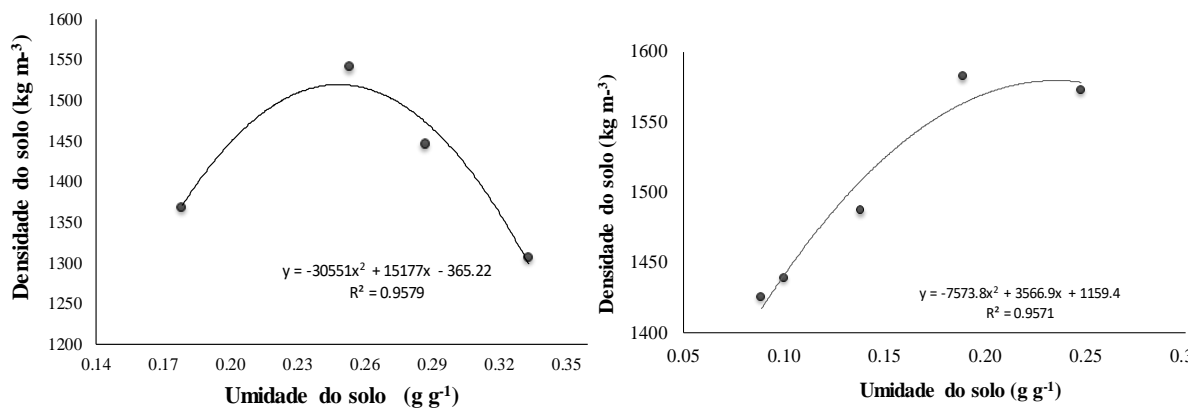
Para as duas camadas (0-0,1 e 0,1-0,2 m) do Latossolo Vermelho Amarelo (Figura 3), as umidades ótimas para compactação foram muito semelhantes, ficando entre 0,13 e 0,14 kg kg<sup>-1</sup> e as máximas densidades foram de 1690,21 e 1838,23 kg m<sup>-3</sup> respectivamente. Apesar da semelhança entre as umidades ótimas de compactação, a camada 0,1-0,2 m apresentou maior densidade, devido ao melhor arranjo das partículas da fração de areia fina.



**Figura 3.** Curvas de compactação para o Latossolo Vermelho Amarelo na camada 0-0,1 m e 0,1-0,2 m respectivamente.

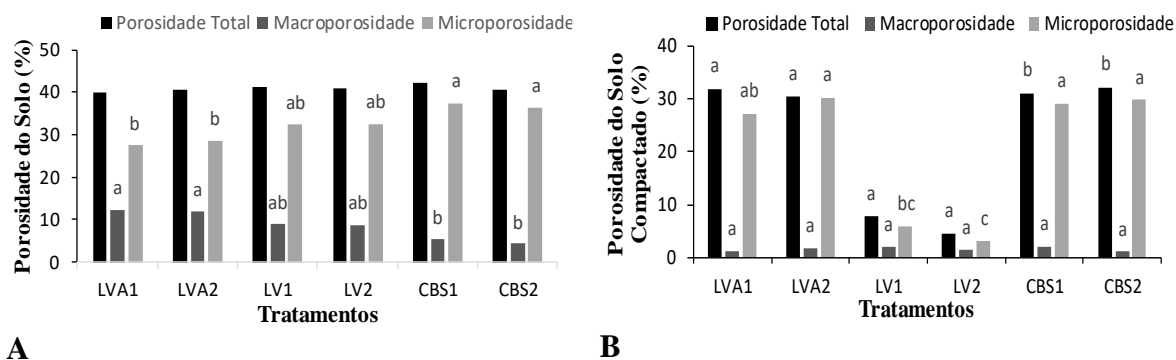
Observa-se que nas curvas de compactação para o Cambissolo Háplico (Figura 4), comparativamente com os demais solos estudados, a densidade máxima de compactação foi menor para as duas camadas, (1519,67 e 1579,36 respectivamente) o que ocorreu inversamente com a umidade ótima de compactação, (0,24 e 0,23 respectivamente) já que esta aumentou, fato também observado por Luciano et al. (2012), que avaliando atributos físicos relacionados a compactação do solo observaram que a umidade ótima de compactação foi maior e a densidade máxima de compactação foi menor no Cambissolo Húmico, isto porque conforme há um aumento da quantidade de argila, há diminuição da densidade máxima de compactação e aumento da umidade ótima de compactação (MARCOLIN & KLEIN, 2011), devido a maior

área superficial específica da argila (REICHERT et al., 2009) e maior capilaridade dos solos argilosos, resultando em maior retenção de água.



**Figura 4.** Curvas de compactação para o Cambissolo Háplico na camada 0-0,1 m e 0,1-0,2 m.

As camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m do Latossolo Vermelho Amarelo apresentaram as maiores médias de macroporos, equivalentes a 12,3 e 11,9 %, respectivamente, diferindo do Cambissolo Háplico, que apresentou valores bastante restritivos, iguais a 5,38 e 4,31% de macroporos para a camada de 0- 0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente (Figura 5). Apesar de ser um solo com alto conteúdo de argila (Tabela 1), esses valores revelam um solo fortemente comprometido, uma vez que se encontra em seu estado natural, ficando aquém do mínimo estabelecido de porosidade de aeração (10%) para o bom desenvolvimento das culturas.



**Figura 5.** Porosidades dos solos nas profundidades de 0-0,1 (1) e 0,1-0,2 (2) m para o Cambissolo Háplico (CBS), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho (LV) na condição de campo (A) e das amostras compactadas pelo método do Proctor normal (B). As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5 % de significância.

A compactação sofrida pelo ensaio de Proctor Normal modifica drasticamente a configuração do espaço poroso, sendo os macroporos os que sofreram maior redução e os microporos tiveram um aumento expressivo para todos os tratamentos. Estudando as modificações na porosidade oriunda da atividade biológica (bioporos) em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja submetido ao tráfego de máquinas Lima et al. (2016) concluíram que a compactação afeta diretamente a configuração da rede porosa, afetando tamanho, distribuição, geometria dos poros, seu volume e continuidade.

O ajuste do modelo dos dados de RP em função da  $\Theta$  e  $D_s$  encontra-se na Tabela 2. Os modelos explicam acima de 72% ( $R^2 \geq 0,72$ ) da variabilidade da RP. Não houve diferença significativa para o Cambissolo Háplico. Já para o Latossolo Vermelho, as mesmas variáveis apresentaram significância. Para o Latossolo Vermelho não houve diferença significativa para a resistência à penetração, para os coeficientes analisados.

**Tabela 2.** Estimativas dos coeficientes de regressão linear para a curva de resistência do solo à penetração ( $\text{LnRP} = \text{Ln}a + b\text{Ln}D_s + c\text{Ln}\theta$ ) para os diferentes sistemas de uso.

Coeficiente	Estimativa	Erro -Padrão	t	p > t
CBS: $\text{RP} = 0,0083 \Theta^{1,0237} D_s^{0,8659}$ ( $p > 0,005$ $R^2 = 0,72$ )				
a	0,008321	0,0364	0,228	0,834
b	1,023748	1,1946	0,857	0,454
c	0,865926	0,4611	1,878	0,157
LV: $\text{RP} = 0,0032 \Theta^{-0,4229} D_s^{0,7420}$ ( $p < 0,005$ $R^2 = 0,96$ )				
a	0,003200	0,0039	0,806	0,4656
b	-0,422988	0,0367	-11,523	0,000324
c	0,742090	0,1663	4,461	0,011154
LVA: $\text{RP} = 1801,176 \Theta^{-5,259} D_s^{-2,050}$ (NS 0,05 $R^2 = 0,28$ )				
a	1801,176	48837,33	0,037	0,97
b	-5,259	3,26	-1,612	0,168
c	-2,050	3,22	0,636	0,553

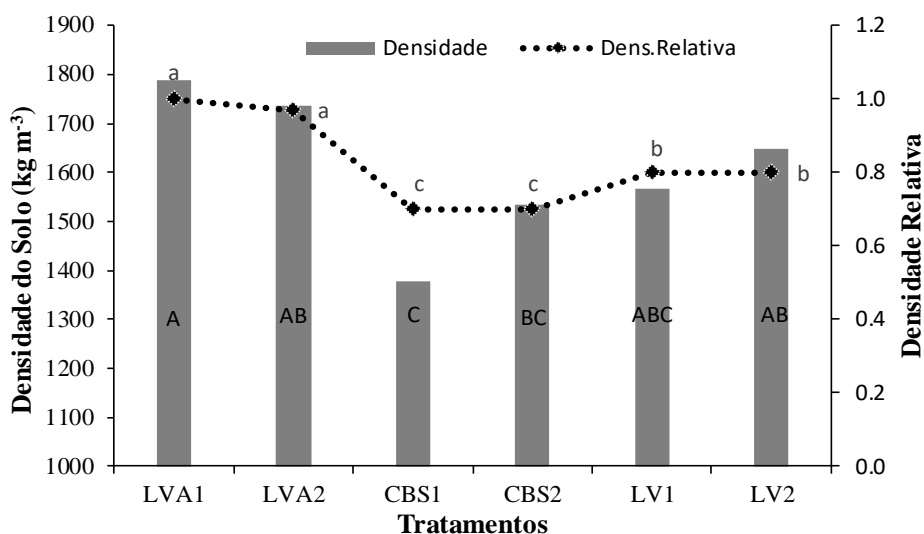
\*RP é a resistência do solo à penetração (MPa);  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ), e  $\theta$  é o conteúdo de água do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

Os maiores valores dos coeficientes a, b e c do Cambissolo (município de Iuiu) indicam maiores valores de RP neste tratamento. Numericamente, o coeficiente c, que está associado à

Ds, para o Cambissolo é maior que para o Latossolo Vermelho. Isso revela uma diminuição na porosidade do solo e alteração do espaço poroso provocando um aumento de Ds, contribuindo para o incremento da RP.

O maior valor absoluto de  $t$  associado a  $\Theta$  associado a Ds, para o Latossolo Vermelho, indica que neste solo, a RP é mais significativamente modificada pela variação de  $\Theta$  do que pela variação de Ds, A umidade do solo atua diminuindo os efeitos da capilaridade, tornando-se mais fácil o rearranjo estrutural das partículas e agindo no controle da RP. Estudos sobre a quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração indicaram que esta foi modificada pelos sistemas de uso e manejo, com dependência da densidade do solo e do conteúdo de água do solo (BLAINSKI et al., 2008).

A densidade do solo no seu estado natural (LVA), nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, foram maiores do que no LV e no CBS em ambas as camadas (Figura 7). Isso se deve ao manejo adotado na área do LVA, que serviu de pastagem por um período de 30 anos, sofrendo com a pressão do pisoteio de animais. Outros fatores, como a baixa cobertura vegetal oferecida pela pastagem degradada, juntamente com o déficit hídrico natural da região, contribuíram para o processo de compactação deste solo, resultando em maiores densidades do solo e menores valores de macroporosidade. Lisboa et al. (2016) relacionando indicadores de qualidade de Latossolo e pastagens degradadas, verificaram um aumento na Ds, sobretudo nas camadas superficiais. Para o LV, o preparo do solo, possivelmente em consistência inadequada, contribuíra para uma maior compactação deste solo, especialmente na camada 0,1-0,2 m.





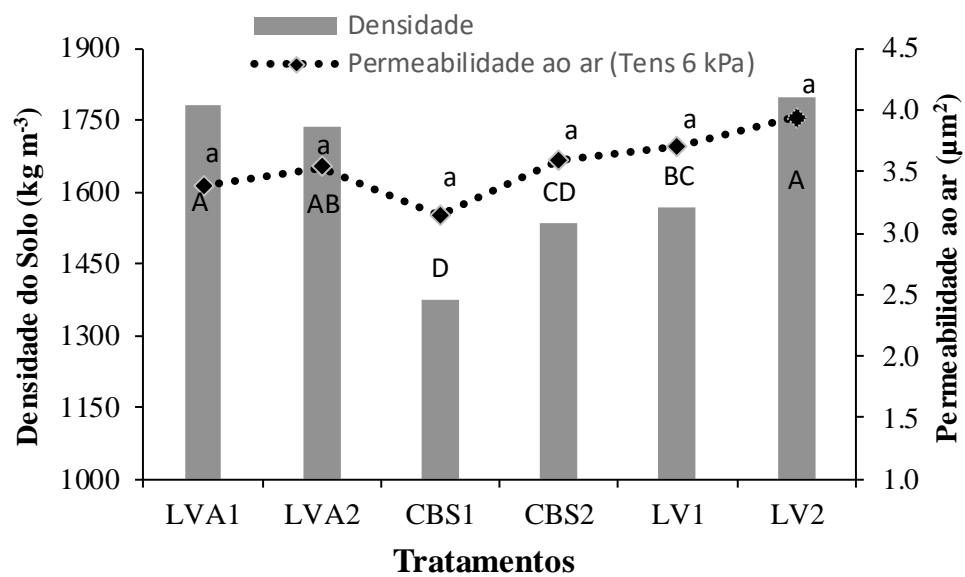
**Figura 7.** Densidade do solo relativa e densidade do solo no estado natural nas profundidades de 0-0,1 (1) e 0,1-0,2 (2) m para o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho (LV) e Cambissolo (CBS). As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5 % de significância.

O pior estado do solo é expresso quando a DR se aproxima da unidade e esse nível máximo de degradação pode ser explicado pelo preparo e manejo inadequados destes solos. Para os três solos as médias de DR entre camadas diferiram entre si, sendo o Latossolo Vermelho Amarelo o que obteve os maiores valores de DR.

Para todas as camadas avaliadas, os valores de DR estão muito próximos do limite crítico para o desenvolvimento da maioria das culturas, estando o solo compactado, o que pode ser também aferido pela RP acima de 2,0 MPa, uma vez que esse é o valor de referência limitante para RP para a maioria das culturas. Ao estudarem densidade relativa como índice de qualidade física do solo, Carvalho et al. (2019) observaram, em um Latossolo, nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, que este apresentou densidade relativa também elevada, maior que 0,9, por conta de compactações decorrentes do manejo do solo, o que implicou em altas densidades.

As densidades do solo no estado natural de LVA1 (camada 0-0,1 m) e LV2 (camada 0,1-0,2 m) foram 1728,20 kg m<sup>-3</sup> e 1798,81kg m<sup>-3</sup>, respectivamente, a composição granulométrica destes dois solos são semelhantes e ricos em areia, solos com alta quantidade desse mineral possuem densidade mais elevada O que pode explicar também essa semelhança é o manejo adotado nas duas áreas, sendo que o LVA foi utilizado por longo período de tempo para criação extensiva de bovino de corte e o LV utilizado como área de plantio, com aração e gradagem o que pode ter levada a formação de uma camada compactada.

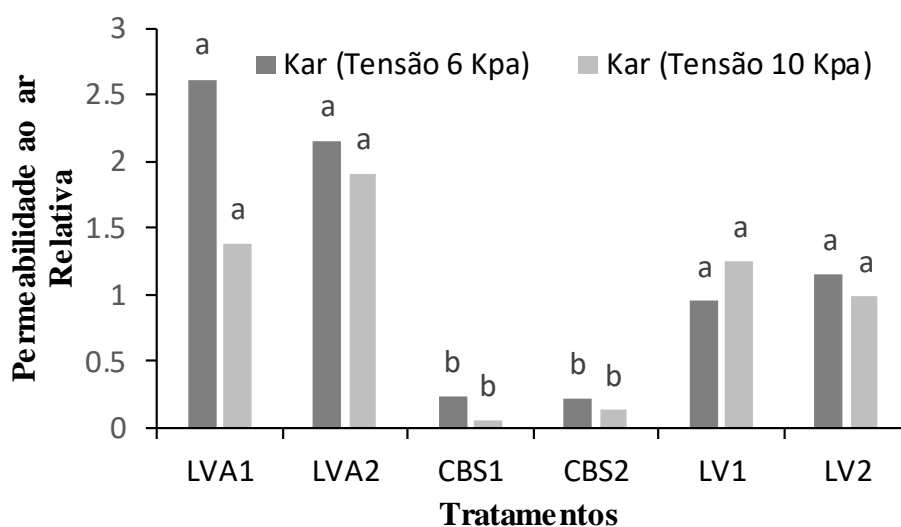
Os valores médios de  $K_a$  (Figura 8) encontrados estão acima do valor crítico proposto por McQueen e Shepherd (2002), onde valores de  $K_a$  abaixo de 1  $\mu\text{m}^2$  é um indicador de solos impermeável a gases. Não houve diferença significativa entre os tratamentos e, muito provavelmente, esse valor crítico de  $K_a$  não deve ser aplicado para os solos tropicais. Moreira et al. (2012), também acharam resultados similares em estudo avaliando o efeito do pisoteio animal em diversos atributos físicos do solo, concluindo que a permeabilidade ao ar não sofreu alterações com a intensificação do pisoteio animal.



**Figura 8.** Densidade do solo e permeabilidade ao ar no estado natural do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) do Cambissolo (CBS e do Latossolo Vermelho (LV) nas camadas de 0-0,1 m (1) e 0,1-0,2 m (2). As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5 % de significância.

A  $K_{ar}$  para o LVA e LV nas tensões de 6 e 10 kPa para ambas as camadas avaliadas foram estatisticamente iguais, tendo os valores muito próximos ou acima da unidade, presumindo que a  $K_{ar}$  está prejudicada por uma estrutura de solo degradada, uma vez que estes dois Latossolos possuem grande quantidade de areia, esse processo de compactação reflete em redução da macroporosidade (Figura 9).

Para o Cambissolo Háplico obteve-se valores de 0,24, 0,22, 0,06 e 0,13 nas camadas de 0-0,1 m e 0-1, 0,2 m, respectivamente, não se diferenciando nestas camadas para as tensões de 6 e 10 kPa, concordando com os resultados encontrados por Carvalho et al. (2019), os quais avaliaram a permeabilidade relativa como índice de qualidade física do solo e assumiram  $K_{ar}$  de 0,3 como um valor de  $K_{ar}$  crítica, enfatizando que acima desse valor as restrições físicas do solo refletem na produtividade das culturas. Entretanto, é importante ressaltar que trata-se de um solo com argila expansiva e que se observou expansão e contração da amostra de solo durante os processos de saturação e de estabilização nas tensões aplicadas (6 e 10 kPa), o que pode ter criado caminhos de fluxo de ar preferencial.



**Figura 9.** Permeabilidade ao ar Relativa do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho (LV) e Cambissolo (CBS) nas camadas de 0-0,1 m (1) e 0,1-0,2 m (2) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## 5. CONCLUSÃO

De forma geral os três solos estudados (LVA, LV e CBS) apresentam estrutura de solo degradada, com necessidade de adoção de boas pratica de manejo de solo.

A permeabilidade ao ar relativa para o Latossolo Vermelho Amarelo e o Latossolo Vermelho, nas duas camadas avaliadas, foram muito próximas ou superiores à unidade e, portanto, com qualidade física ruim para o adequado cultivo.

O Cambissolo Háplico apresentou valores abaixo de 0,25 para ambas as camadas, o que é um indicativo de boa condição física, entretanto, com a ressalva de se tratar de um solo com a presença de argila expansiva, o que pode provocar fluxo de ar preferencial.

## 6. LITERATURA CITADA

ALAM, J. et al. Permeability of stratified soils for flow normal to bedding plane. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 660-667, 2015.

BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C. & MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **J. Soil Sci.**, 41:215-228, 1990.

BLAINSKI, Éverton et al. . Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975-983, June 2008. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832008000300007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000300007&lng=en&nrm=iso)>. access on 20 May 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007>. **Bras. Ci. Solo**, 29:677-684, 2005.

BRITO, Alexandro dos Santos et al. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 17-24, Feb. 2009. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832009000100002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000100002&lng=en&nrm=iso)>. access on 03 Dec. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000100002>.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1939-1948, 2011.

BUSSCHER, W.J.; BAUER P.J.; CAMP C.R. & SOJKA R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. **Soil Till. Res.**, 43:205-217, 1997.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CARVALHO, Ian Carlos Bispo de et al. Actual and Relative Soil Air Permeability as Soil Physical. **Journal Of Agricultural Science**, [s.i.], v. 14, n. 11, p.475-486, 31 ago. 2019. Mensal. Disponível em: <<https://doi.org/10.5539/jas.v11n14p1>>. Acesso em: 27 fev. 2020.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research** 103:158-164, 2009.

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, p.201-214, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>. Acesso em: 10 nov.2019.

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, p.201-214, 2004a.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 355 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub>. Acesso em: 10 abr. 2020.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: Sociedade Americana de Agronomia, 2002. p. 255-289.

GUEDES FILHO, O; BLANCO-CANQUI, H; DA SILVA, A.P. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. IMHOFF, Silvia; SILVA, Alvaro Pires da; TORMENA, Cássio Antonio. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, July 2000. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2000000700025&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2000000700025&lng=en&nrm=iso)>. access on 20 May 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000000700025>.

JESUS, Marcelo Couto de et al. PERMEABILIDADE AO AR E POROSIDADE DE SOLOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 3, p.230-239, ago. 2017.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America Proceedings**, Flórida, v. 11, p.93-99, 1946.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; BASEGGIO, M. Ensaio de Proctor normal – análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v.12 n.2, p.199-203, 2013.

KRUSKAL, WILLIAM H.; WALLIS, W. ALLEN (1 de dezembro de 1952). «[Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis](#)». *Journal of the American Statistical Association*. **47** (260): 583–621. [ISSN 0162-1459](#). [doi:10.1080/01621459.1952.10483441](#).

LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P. & ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *R.*

LISBOA, Fabrício Marinho et al . Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 51, n. 9, p. 1184-1193, set. 2016 . Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2016000901184&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2016000901184&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 30 out. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900018>.

LUCIANO, Rodrigo Vieira et al . Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 36, n. 6, p. 1733-1744, Dec. 2012 . Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832012000600007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000600007&lng=en&nrm=iso)>. access on 20 Feb. 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600007>.

MACEDO, Vera R. M.; SILVA, Apolino J. N. da; CABEDA, Mário S. V.. Influência de tensões compressivas na pressão de precompactação e no índice de compressão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 14, n. 8, p.856-862, 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662010000800010>.

MANTOVANI, E.C. **Compactação do Solo**. *Inf. Agropec.*, 13:52- 55, 1987.

MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Sci. Agron.**, 33:349- 354, 2011.

MCKENZIE, B.M. & DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. **J. Agric. Eng.Res.**, 65:23-28, 1996.

McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fien-textured, poorly drained soil (TypicEndoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **SoilTill. Res.**, 25:217-230, 2002.

MOREIRA, Wagner Henrique et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.389-400, abr. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000200008>.

MOREIRA,F.R.;DECHEN,S.C.F.;SILVA,A.P.;FIGUEIREDO,G.C.;DEMARIA,I.C.PESSONI, P.T.Intevalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema de semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.38, p.118-127,2014.

NEVES, C.M.N.; SILVA. A.P. & LEÃO, T.P. **Permeabilidade ao ar em amostras de solo pelo método de pressão decrescente**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Resumos... Santa Maria, 2004.

RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E.; AMIR, I.; CHASSE, M. & BROUGHTON, R.S. Prediction of compaction due to off-road vehicle traffic. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 19:610-613, 1976.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & KANSSON, I.H. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop, production in subtropical highly weathered soils. **Soil Tillage Res.**, 102:242-254, 2009.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Propriedades física do solo**. Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2006.

RODRIGUES, Sueli et al . Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 35, n. 1, p. 105-114, Feb. 2011 .Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832011000100010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000100010&lng=en&nrm=iso)>. access on 05 Nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100010>.

SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. Analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52:591-611, 1965.

SILVA, Álvaro Pires da et al . Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 33, n. 6, p. 1535-1545, Dec. 2009 . Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832009000600003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000600003&lng=en&nrm=iso)>.accesson 10 Nov. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600003>.



SILVEIRA, L.R.; BRITO, A.S.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.429-436, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200012>>. Acesso em: 10/10/2018.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11.ed. Washington: United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 2010. 338p

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:229-235, 1991<sup>a</sup>.

VASCONCELOS, R.F.B.; SOUZA, E.R.de.; CANTALICE, J.R.B et al. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p.381-386, 14 nov. 2013. .N.; SILVA.

WHELAN, B.M.; KOPPI, A.J.; McBRATNEY, A.B. & DOUGHERTY, W.J. An instrument for the *in situ* characterisation of soil structural stability based on the relative intrinsic permabilities to air and water. **Geoderma**, 65:209-222, 1995.

