



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: SOLOS E NUTRIÇÃO DE**  
**PLANTAS**

**ALCIONE GUIMARÃES FREIRE**

**ÍNDICES DE QUALIDADE FÍSICA PARA UM CAMBISSOLO EM SISTEMAS DE**  
**MANEJO**

**FORTALEZA**

**2012**

ALCIONE GUIMARÃES FREIRE

ÍNDICES DE QUALIDADE FÍSICA PARA UM CAMBISSOLO EM SISTEMAS DE  
MANEJO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- F933i Freire, Alcione Guimarães.  
Índices de qualidade física para um cambissolo em sistemas de manejo / Alcione Guimarães Freire.  
– 2012.  
81 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,  
Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de  
Plantas, Fortaleza, 2012.  
Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.  
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.
1. Solos – Manejo. 2. Solos – Qualidade. 3. Solos - Análise. I. Título.

ALCIONE GUIMARÃES FREIRE

ÍNDICES DE QUALIDADE FÍSICA PARA UM CAMBISSOLO EM SISTEMAS DE  
MANEJO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em: 13/07/2012.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. José Francismar de Medeiros  
Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)

---

Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

**À MINHA MÃE**

*Maria Vanda Guimarães*

Pelo amor, carinho e pelo incentivo a lutar  
sempre pelos meus sonhos.

**OFEREÇO**

**AOS MEUS AVÓS**

*Faustino Rodrigues Guimarães*

*Maria Petronila Guimarães*

Por serem meus grandes exemplos de vida e  
pelos conselhos que guardo comigo até hoje.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e por todos os sonhos alcançados.

À minha irmã, Alcilene Guimarães Freire, pelo seu exemplo de força e determinação.

À minha namorada, Eliane de Freitas Gadelha, pela compreensão, amor e carinho, estando presente em todos os momentos, sejam eles de dificuldades ou de alegrias.

Aos meus tios Deuzimar Faustino Guimarães, Francisco Jucier Guimarães, Idelson Faustino Guimarães, José Faustino Guimarães e Vande Cleide Guimarães, pelo apoio e incentivo durante toda a minha carreira estudantil.

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação, amizade e ensinamentos de vivência, além de exercer sua função de professor e pesquisador de forma tão responsável.

Ao Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pelos ensinamentos e exemplo de um profissional de boa índole.

Ao Prof. Paulo Leonel Libardi, pela generosidade e orientação durante o semestre em que estive na ESALQ/USP.

Ao Prof. José Francismar de Medeiros, pela orientação durante o curso de graduação e por despertar em mim o interesse pela pesquisa.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Departamento de Ciências do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade da realização do curso de mestrado.

Aos professores da UFC Boanerges Freire de Aquino, Fernando Felipe Ferreyra Hernandez, Mirian Cristina Gomes Costa, Ricardo Espíndola Romero e Tiago Osório Ferreira, pelo conhecimento transmitido nas suas disciplinas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por ter possibilitado a minha ida à ESALQ via Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD 125/07).

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro a esta dissertação via projeto DCR - 0024-00013.01.00/10.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), pela oportunidade dada para cursar o meu segundo semestre do mestrado.

Aos professores da ESALQ, Alvaro Pires da Silva, Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Gerd Sparovek, Miguel Cooper e Sergio Oliveira Moraes, pelo conhecimento transmitido.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo Antônio José Duarte de Menezes, Francisco José da Silva e José Tavares da Costa, pelo auxílio nas análises.

Ao proprietário rural João Edilson Saldanha Oliveira, por ter concedido a área para realização dos estudos.

A Adilson Nunes da Silva, Luzimario Lima Pereira e Roque Emmanuel da Costa de Pinho, pelo acolhimento em sua residência durante a minha estada em Piracicaba. A Roque, particularmente, pela correção linguística desta dissertação.

Aos colegas de Piracicaba Adriano Dicesar Martins de Araujo Gonçalves, Angelica Durigon, Cristhiane Anete Neiverth, Fernando Henrique Setti Gimenes, Francisco Bernardo Dias, Francisco Dirceu Duarte Arraes, Helon Hébano de Freitas Sousa, Luciano Roberto da Silveira, Marcelo Dias Oliveira, Marcos Alex dos Santos e Neilo Bergamin Moreira, pelo acolhimento durante o período em que estive na ESALQ/USP.

Aos colegas da UFC Bruno Laecio da Silva Pereira e Jaime dos Santos Henrique, pela ajuda na coleta de solo; Levi Anastácio, pelo auxílio na análise estatística; João Paulo Cajazeiras, pela intermediação feita entre a UFC e o proprietário da área de estudo.

Aos colegas da UFERSA Daniel da Costa Dantas, pelos conselhos e momentos de descontração; Francisco de Assis de Oliveira, por ter me inserido no grupo de pesquisa IRRIGANUTRI e me incentivado na carreira científica; Stefeson Bezerra de Melo, pelos ensinamentos estatísticos e computacionais.

Aos colegas do curso de mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas da UFC (2010.2) Alide Mitsue Watanabe Cova, Ana Paula Guimarães Santos, Antônia Arleudina Barros de Melo, Bruno Laecio da Silva Pereira, Eurileny Lucas de Almeida, Hermes de Paula Moreira Oliveira, Jordânia Maria Gabriel Pereira, José Aridiano Lima de Deus, Maria Auxiliadora Conceição de Freitas, Naiara Célida dos Santos de Souza, Rafael Cipriano da Silva e Rafaela Watanabe, pelo companheirismo e troca de conhecimentos ao longo do curso.

Aos colegas da sala de estudo, na UFC, pelo convívio alegre e harmonioso.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original.”  
(Albert Einstein)

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Vista aérea das áreas onde foram coletadas as amostras de solo (C – camalhão, S – sulco, M - mata)..... 27
- Figura 2 - Esquema ilustrativo do cultivo de mamoeiro em camalhão (A) e sulco (B). ..... 28
- Figura 3 - Densidade do solo, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 39
- Figura 4 - Densidade de partículas, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 40
- Figura 5 - Teores de matéria orgânica, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 41
- Figura 6 - Estabilidade dos agregados (4,76-2,00 mm) em água, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. .... 42
- Figura 7 - Diâmetro médio ponderado, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 43
- Figura 8 - Resistência do solo à penetração, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 44
- Figura 9 - Curvas características de água no solo para os sistemas de manejo em sulco e camalhão e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. ... 45
- Figura 10- Frequência acumulada de poros para os sistemas de manejo em sulco e camalhão e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. ... 46

Figura 11- Índice S, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	47
Figura 12- Valores de Índice $S_{relativo}$ , com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa (dados transformados para $1/x$ ). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ....	48
Figura 13- Condutividade hidráulica da superfície do solo, com desvios-padrão da média, para os sistemas de manejo em sulco e camalhão e sob mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma tensão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ....	49
Figura 14- Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e porosidade de aeração para o solo cultivado com mamoeiro em sistema de sulco e camalhão e sob mata nativa, nas profundidades de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).....	51
Figura 15 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar em função da tensão da água no solo em solo cultivado com mamoeiro sob sistema em sulco e camalhão e sob mata nativa, nas profundidades de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).....	53
Figura 16 - Comportamento dos indicadores de qualidade física do solo: Índice S (S), Índice $S_{relativo}$ ( $S_r$ ), Permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), Porosidade de aeração ( $\epsilon_{ar}$ ), Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ), Resistência à penetração (RP), Densidade do solo ( $D_s$ ) em relação a valores críticos de referência para os sistemas de manejo do solo na camada de 0,0 a 0,3 m. ....	56
Figura 17 - Dispersão dos atributos físicos em diferentes condições de uso do solo. Ag = percentagem de agregados estáveis na classe (> 2,0 mm); DMP = diâmetro médio ponderado; $D_s$ = densidade do solo; GF = grau de floclulação; $K_{ar}$ = permeabilidade intrínseca do solo ao ar; MO = matéria orgânica; Mp = macroporosidade; N = índice de continuidade de poros, N; Pt = porosidade total; RP = resistência à penetração; S = índice S; $S_r$ = Índice $S_{relativo}$ . C1, C2, C3 e C4 correspondem ao sistema de cultivo de mamoeiro sob camalhão, S1, S2, S3 e S4 ao sistema de cultivo de mamoeiro sob sulco e M1, M2, M3 e M4	

à mata nativa, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m..... 59

Figura 18 - Dissimilaridade entre os grupos estabelecida por distância euclidiana a partir dos atributos argila, areia, silte, grau de flocculação; percentagem de agregados estáveis na classe (> 2,0 mm); diâmetro médio ponderado; matéria orgânica; densidade do solo; resistência à penetração; macroporosidade; porosidade total; permeabilidade intrínseca do solo ao ar; índice N de continuidade de poros; índice S; índice  $S_{\text{relativo}}$ . C1, C2, C3 e C4 correspondem ao sistema de cultivo de mamoeiro sob camalhão, S1, S2, S3 e S4 ao sistema de cultivo de mamoeiro sob sulco e M1, M2, M3 e M4 à mata nativa, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m..... 60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos do solo em sistemas de manejo.....	26
Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural, grau de flocculação e classe textural).....	38
Tabela 3 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) para o solo sob cultivo de mamoeiro e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m e nas tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 kPa.....	50
Tabela 4 - Parâmetros da equação de regressão de $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e porosidade bloqueada $\varepsilon_b$ para o solo sob cultivo de mamoeiro e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.....	54
Tabela 5 - Índice de continuidade de poros ( $C_p$ ) para o solo sob cultivo de mamoeiro e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.....	55
Tabela 6 - Autovalores e percentual da variância explicada por cada componente.....	57
Tabela 7 - Correlação dos atributos analisados com os componentes principais (CP) obtidos a partir de todos os atributos analisados.....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Cultura do mamoeiro .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Qualidade do solo.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Indicadores de qualidade física do solo.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1 Densidade do solo .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2 Porosidade do solo .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2.1 Porosidade de aeração.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.3 Matéria orgânica .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.4 Estabilidade dos agregados .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.5 Resistência do solo à penetração .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.6 Curva característica de água no solo.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.7 Índice S .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.8 Condutividade hidráulica.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.9 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros .....</b>	<b>24</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Local do experimento .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Caracterização da área experimental .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Amostragem .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Atributos analisados .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.1 Densidade do solo .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.2 Densidade das partículas .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.3 Granulometria .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.4 Argila dispersa em água.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.5 Grau de floculação .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.6 Carbono orgânico.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.7 Porosidade .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.8 Curva característica de água no solo.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.9 Índice S .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.10 Estabilidade de agregados .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.11 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.12 Índices de continuidade dos poros .....</b>	<b>34</b>

3.4.13 Resistência do solo à penetração .....	35
3.4.14 Infiltração da água no solo .....	35
3.4.15 Análise dos dados .....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
4.1 Textura do solo.....	37
4.2 Densidade do solo e de partículas .....	38
4.3 Agregados do solo .....	40
4.4 Resistência do solo à penetração.....	43
4.5 Curva característica de água no solo e frequência acumulada de poros.....	45
4.6 Índices S e $S_{\text{relativo}}$ .....	46
4.7 Condutividade hidráulica do solo.....	48
4.8 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros .....	49
4.9 Considerações sobre os indicadores de avaliação física do solo .....	55
4.10 Análise multivariada.....	56
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>69</b>

## RESUMO

A Chapada do Apodi vem se destacando como um promissor polo de fruticultura irrigada em virtude da potencialidade agrícola dos seus solos, os quais são submetidos a diferentes tipos de manejo, condicionando mudanças em seus atributos físicos. O trabalho teve como objetivo avaliar fisicamente um Cambissolo cultivado com mamoeiro (*Carica papaya* L.) sob dois sistemas de manejo, comparado com um sob vegetação nativa. Foram coletadas amostras de solo com estruturas deformada e indeformada para a realização das análises físicas, a saber: granulometria, argila dispersa em água, densidade do solo e de partículas, estabilidade de agregados, carbono orgânico, curva característica de água no solo, permeabilidade intrínseca do solo ao ar e resistência à penetração. Foram calculados o grau de flocculação das argilas, a porosidade do solo, índices relativos à geometria porosa e matéria orgânica. Em campo foi realizado ensaio de infiltração de água no solo. Os dados experimentais foram analisados considerando o delineamento inteiramente casualizado, adotando-se para todas as análises o esquema em parcela subdividida 3x3x5 (dois sistemas de manejo do solo – plantio do mamoeiro em sulco e camalhão – e mata nativa secundária; três camadas de solo – 0,0-0,1 m; 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m; cinco repetições), exceção para a condutividade hidráulica, em que se adotou o esquema fatorial 3x2x5 (dois sistemas de manejo do solo e mata nativa; duas tensões – 0 hPa e 5 hPa; cinco repetições). Foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados, o F para a análise de variância, o de Tukey para a comparação de médias (todos a 5% de probabilidade) e técnicas multivariadas de análise. Concluiu-se que: a) a hipótese de que os sistemas de cultivo pioram os solos fisicamente foi refutada, indicando que a qualidade dos atributos do solo sob cultivo, em geral, está mantida ou melhorada em relação à condição de mata nativa; b) o decréscimo do teor de matéria orgânica, da percentagem de agregados estáveis na classe de 4,76-2,00 mm de diâmetro e do diâmetro médio ponderado em solo cultivado, apesar de ainda estarem distantes de limites considerados críticos, são indicadores da necessidade de adoção de práticas de manejo que evitem o desencadeamento de um processo de degradação do solo; c) os indicadores de qualidade foram sensíveis às alterações provocadas pelos sistemas de manejo do solo e, portanto, podem ser utilizados como fonte para a interpretação da dinâmica de processos físicos do solo no tempo; d) O indicador proposto para a avaliação da qualidade física do solo, o  $S_{\text{relativo}}$ , mostrou-se sensível para mensurar a resposta do solo às ações sobre sua estrutura.

**Palavras-chave:** qualidade do solo; Chapada do Apodi; continuidade de poros.

## ABSTRACT

The Apodi Tableland has emerged as a promising pole of irrigated fruit because of the agricultural potential of its soils. Soils of Apodi Tableland are subjected to different types of management, thus conditioning changes in their physical attributes. This work aims to evaluate physically a Cambisol cultivated with papaya (*Carica papaya* L.) under two tillage systems, compared to another under secondary forest. Soil samples with disturbed and undisturbed structure were collected for physical analysis, namely: texture, clay dispersed in water, bulk density, particle density, aggregate stability, organic carbon, soil water retention curve, soil air permeability and soil resistance to penetration. Clay flocculation degree, soil porosity and indices related to porous geometry and organic matter were calculated. A soil water infiltration test was performed at field. The factorial scheme was 3x3x5 (two soil management systems – papaya planted on furrow and ridge – and secondary forest; three soil layers – 0-0.1 m; 0.1-0.2 m, 0.2-0.3 m; five replications), conducted in a completely randomized design, except for the hydraulic conductivity, which adopted a factorial scheme 3x2x5 (two soil management systems and secondary forest; two tensions – 0 hPa and 5 hPa, five replications). The Kolmogorov-Smirnov Test was used to verify the data set normality, the F Test for variance analysis, the Tukey Test for means comparison (all using p-value = 0.05) and multivariate analysis techniques. It was concluded that: a) the hypothesis that the tillage systems physically worsen soil was refuted, indicating that the quality of the attributes of cultivated soil, in general, has been maintained or improved in relation to the status of the native soil; b) the decreases of the organic matter content, percentage of stable aggregates in the diameter class of 4.76 to 2.00 mm and the average diameter on the cultivated soil, although they are still far from critical limits, are indicative of the need for adoption of management practices that avoid triggering a soil degradation process; c) the quality indices were sensitive to changes caused by soil tillage systems and therefore can be used as a source for understanding the dynamics of soil physical processes in time; d) the proposed indicator for evaluating soil physical quality,  $S_{relative}$ , was sensitive to measure the soil response to the action on its structure.

**Keywords:** soil quality; Apodi Tableland; pore continuity.

## 1 INTRODUÇÃO

A Chapada do Apodi, localizada na porção leste do estado do Ceará, na divisa com o estado do Rio Grande do Norte, vem se destacando como um promissor polo de fruticultura irrigada em virtude da potencialidade agrícola dos seus solos, topografia plana e viabilidade de irrigação. Nesta região, pesquisas relacionadas à qualidade do solo, especificamente quanto à qualidade física, são escassas e, portanto, tornam-se necessárias em um curto decurso de tempo.

Nos últimos anos, pesquisadores da área de ciência do solo têm se preocupado com o tema qualidade do solo, procurando identificar e selecionar indicadores associados a determinadas funções que o mesmo deve desempenhar e definir valores quantitativos e mensuráveis desses indicadores. As propriedades físicas do solo influenciam o ambiente e a escolha do melhor manejo a ser adotado, sendo decisivas no sucesso ou fracasso de uma exploração agrícola.

Estudos relativos ao monitoramento da qualidade do solo pelos atributos físicos são importantes para a avaliação e manutenção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, além de sinalizar o manejo adequado do ambiente visando à sua conservação e produtividade. Um atributo indicador da qualidade do solo deve, portanto, ser sensível às variações do manejo ao qual o solo está submetido.

Neste contexto, o trabalho partiu das hipóteses de que: 1) os sistemas de manejo utilizados na área em estudo, por fazer uso de máquinas e implementos que modificam o ambiente físico do solo, alteram sua qualidade piorando-a em comparação a um solo sob vegetação natural; 2) as alterações do solo podem ser aferidas a partir de índices e interpretadas sob o aspecto de sua qualidade física; e 3) a partir do índice S é possível definir outro indicador que quantifique as alterações na estrutura do solo. Portanto, objetivou-se avaliar a qualidade física do solo sob cultivo de mamoeiro irrigado na Chapada do Apodi, propor indicadores, com o intuito de avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo sobre propriedades físicas do solo relacionadas à sua qualidade, indicar os riscos de degradação do ambiente impostos pelo uso agrícola atual e apresentar alternativas, se necessário, para os sistemas de manejo do solo e da cultura do mamoeiro comprometedores da sustentabilidade da atividade agrícola.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultura do mamoeiro

O mamoeiro cultivado comercialmente (*Carica papaya* L.) pertence à família Caricaceae. Apresenta sistema radicular pivotante, distribuindo-se em maior quantidade nos primeiros 30 cm do solo, com raiz principal bastante desenvolvida. Sendo uma planta tropical, o mamoeiro se desenvolve melhor em temperaturas mais elevadas, possuindo como faixa ótima para o seu crescimento as regiões com temperaturas de 22 °C a 26 °C e umidade relativa do ar acima de 60%. O mamoeiro é sensível à inundação, visto que ocorre deficiência de oxigênio ao sistema radicular (DANTAS e CASTRO NETO, 2000).

No cenário mundial, a produção brasileira de mamão desponta como a segunda maior do mundo oscilando em torno de 1,8 a 1,9 milhões de toneladas anuais (FAO, 2012). Em termos de produção nacional, o estado do Ceará ocupa a terceira posição com produção de 102 mil toneladas (IBGE, 2010). Em termos de rentabilidade, o Valor Bruto da Produção (VBP) em 2009 foi calculado em R\$ 1,348 bilhão, bem acima do R\$ 1 bilhão apurado um ano antes. O valor obtido com as operações internacionais em 2010 foi de US\$ 35,1 milhões, pouco acima dos US\$ 34,4 milhões alcançados em 2009. Os principais destinos têm sido a Comunidade Europeia e Estados Unidos (ABF, 2011).

### 2.2 Qualidade do solo

A discussão sobre qualidade do solo intensificou-se no início de 1990, quando a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental, começou a abordar, nas publicações, a preocupação com a degradação dos recursos naturais, a sustentabilidade agrícola e a função do solo nesse contexto (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009).

O conceito de qualidade do solo tem várias abordagens entre pesquisadores da área de ciência do solo. A maioria delas, atualmente, baseia-se em Larson e Pierce (1994) que definem a qualidade do solo como uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas que fornece os meios para a produção vegetal e animal, para regular o fluxo de água no ambiente e para servir como um filtro ambiental na atenuação e degradação de componentes ambientalmente danosos ou perigosos.

Tendo em vista que o uso inadequado de técnicas de manejo do solo provoca a sua degradação e, conseqüentemente, reduz o seu potencial produtivo, indicadores de qualidade física do solo são úteis na avaliação de sistemas de manejo.

Relacionando sustentabilidade com qualidade do solo, Larson e Pierce (1994) sugerem que há duas maneiras para avaliar a sustentabilidade de um sistema de manejo agrícola: avaliação comparativa e avaliação dinâmica. Na primeira, o desempenho de um sistema é avaliado em relação a alternativas em um dado tempo somente. Na avaliação dinâmica, o desempenho de um sistema é avaliado em relação a alternativas através do tempo. É de fundamental importância o estabelecimento de índices de qualidade do solo para identificar problemas de produção nas áreas agrícolas, fazer estimativas realísticas da produção de alimentos, monitorar mudanças na sustentabilidade e qualidade ambiental em relação ao manejo agrícola e orientar políticas governamentais voltadas para o uso sustentável do solo (DORAN e PARKIN, 1994).

Do ponto de vista físico, a capacidade do solo de promover condição satisfatória para o crescimento e desenvolvimento da planta descreve como este permite a infiltração, retenção e disponibilidade de água, responde ao manejo, resiste à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e o crescimento das raízes (REICHERT et al., 2003).

### **2.3 Indicadores de qualidade física do solo**

Um indicador de qualidade do solo deve identificar um conjunto de propriedades do solo, atendendo aos seguintes critérios: elucidar processos do ecossistema e relacioná-los aos processos-modelo; integrar propriedades biológicas, físicas e químicas do solo e os respectivos processos; ser acessível a muitos usuários e aplicável a condições de campo; ser sensível a variações de manejo e de clima ao longo do tempo; e, quando possível, ser componente de banco de dados já existente (DORAN e PARKIN, 1994).

Os critérios para escolha de indicadores de qualidade do solo dependem dos objetivos que se têm, sendo a sensibilidade do indicador às alterações no processo uma das principais características requeridas. Valores ótimos relativos à qualidade física do solo para aumentar a produtividade dos cultivos e manter ou melhorar as condições ambientais ainda são desconhecidos (REINERT et al., 2006; REYNOLDS et al., 2002).

Água, oxigênio, temperatura e resistência mecânica são fatores que estão associados à emergência de plantas e ao crescimento radicular, agindo diretamente no

crescimento de plantas (PEDROTTI e MELLO JÚNIOR, 2009). Portanto, é necessário o desenvolvimento de indicadores quantitativos da qualidade física do solo relacionados com propriedades físicas como textura, estrutura, porosidade, retenção de água no solo, permeabilidade intrínseca do solo ao ar etc., pois afetam diretamente os fatores citados anteriormente e, portanto, indiretamente o crescimento e produtividade de plantas.

### ***2.3.1 Densidade do solo***

A densidade do solo pode ser definida como sendo a razão entre a massa de uma amostra de solo seca a 105-110 °C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (KIEHL, 1979).

De acordo com Klein (2008), os valores de densidade dos solos agrícolas variam de 0,9 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica do solo. Utilizando o conteúdo de argila como referência, Reinert et al. (2001) propuseram valores críticos de densidade do solo, sendo de 1,45 g cm<sup>-3</sup> para solos com mais de 55% de argila, 1,55 g cm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila entre 20 e 55% de argila e 1,65 g cm<sup>-3</sup> para solos com menos de 20% de argila.

Segundo Kiehl (1979), de maneira geral, quanto mais elevada for a densidade do solo pior será sua estruturação e menor a sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores serão as restrições para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A densidade do solo tende a aumentar com o aumento da profundidade no perfil, e isto se deve ao menor teor de matéria orgânica, menor agregação, pouca quantidade de raízes e adensamento causado pela massa das camadas superiores.

O conhecimento do comportamento da densidade pode constituir importante indicativo das condições de manejo de determinado solo (FERREIRA, 2010). Em estudo avaliando sistemas de preparo do solo, Assis e Lanças (2005) obtiveram menores valores de densidade na camada superficial sob mata nativa e sistema de plantio direto em relação ao preparo convencional, tal fato sendo justificado pelo maior teor de matéria orgânica que favorece melhor estruturação e, por conseguinte, redução na densidade do solo. Avaliando efeitos de cargas de máquinas sobre propriedades físicas de um Cambissolo, Cavalieri et al. (2009a) verificaram que os efeitos da pressão no solo acarretaram aumento de sua densidade em superfície. Também em Cambissolo cultivado com melão em manejo convencional, Mota et al. (2008) encontraram densidade acima dos valores normais para solos afins. Nota-se então que a densidade pode ser alterada pelo uso e manejo do solo, provocando alterações nas

propriedades físico-hídricas como porosidade, retenção de água, condutividade hidráulica e resistência à penetração.

### ***2.3.2 Porosidade do solo***

É um índice que quantifica a fração do volume do solo ocupada pelos poros, sendo inversamente relacionada com a densidade do solo, isto é, quanto maior a densidade menor a porosidade (LIBARDI, 2005). O arranjo ou a geometria das partículas do solo determina a quantidade e a natureza dos poros existentes (KIEHL, 1979). Classificando os poros do solo pelo seu diâmetro, Richards (1965) os separou em microporos ( $< 50 \mu\text{m}$ ) e macroporos ( $\geq 50 \mu\text{m}$ ). A principal função dos microporos é a retenção de água, enquanto que a dos macroporos é a drenagem e aeração do solo (LIBARDI, 2005).

Em sistema de preparo convencional, a camada superficial é revolvida seguidamente por arações e gradagens, o que incrementa a porosidade do solo nessa camada, apesar de a pequena capacidade de ser mantida indefinidamente após o revolvimento. No entanto, na camada subjacente de solo, limitada ao alcance dos implementos, a compactação é severa e se faz perceber principalmente em longo prazo e em culturas perenes (ALCÂNTARA e FERREIRA, 2000). Avaliando as alterações que o manejo do solo provoca nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, Klein e Libardi (2002b) concluíram que o manejo do solo irrigado, comparado ao solo de mata e sequeiro, aumentou a densidade do solo até a profundidade de 40 cm, alterando, conseqüentemente, a distribuição do diâmetro dos poros e a porosidade de aeração. Avaliando a qualidade física de um solo cultivado e sob mata nativa, Araújo et al. (2004) observaram que os valores de macroporos e de porosidade total do solo foram bem menores no solo cultivado quando comparados com os do solo sob mata nativa; em relação aos microporos, não foi encontrada diferença significativa entre os dois sistemas estudados.

#### ***2.3.2.1 Porosidade de aeração***

É a porosidade livre de água, ou seja, quanto do volume de solo está preenchido com ar. O desenvolvimento das raízes que contribui para o crescimento e aumento de produtividade das plantas tem relação direta com a porosidade de aeração do solo. A aeração do solo permite a troca gasosa do  $\text{CO}_2$  presente nos poros pelo  $\text{O}_2$  atmosférico. Estudos desenvolvidos por volta de 1940 mostraram que porosidade de aeração inferior a 10% é

prejudicial para a produção agrícola. Esse valor foi adotado como referencial e tem sido utilizado como índice de qualidade física do solo nos estudos que envolvem a caracterização da distribuição de poros por tamanho (FERREIRA, 2010).

Conforme Jong van Lier (2001), em estudo sobre processo de aeração no sistema radicular, a porosidade total do solo, a profundidade a ser aerada e o nível de consumo de oxigênio influem significativamente na porosidade de aeração mínima necessária para uma oxigenação completa de um sistema radicular, devendo ser considerados para melhor estimar a porosidade de aeração mínima necessária.

### ***2.3.3 Matéria orgânica***

O teor de matéria orgânica não é propriamente um indicador de qualidade física do solo, mas influencia direta e indiretamente várias propriedades que estabelecem a sua qualidade física (CHRISTENSEN e JOHNSTON, 1997). Um dos processos do solo mais afetados pela matéria orgânica é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetados os atributos físicos do solo, como densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e infiltração de água, entre outros, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo (BAYER e MIELNICZUK, 2008).

O efeito granulante da matéria orgânica é mais acentuado em solos que contêm pequenas quantidades de argila. A associação entre matéria orgânica e agregação é alta quando o conteúdo de argila é menor que 25% (AMARO FILHO et al., 2008). Segundo Mota (2004) em estudos na Chapada do Apodi - RN, a baixa densidade de vegetação, aliada às elevadas temperaturas, tem se constituído fator limitante ao aporte de compostos orgânicos ao sistema, sendo imprescindível a adoção de sistemas de manejo que condicionem um maior aporte de material orgânico ao solo.

De acordo com Bayer e Mielniczuk, (1999), os sistemas convencionais de cultivo envolvendo aração e gradagem são considerados os de maior poder de degradação, resultando, na maioria das vezes, na redução dos teores de matéria orgânica no solo. As perdas de matéria orgânica são favorecidas, principalmente, pelo revolvimento do solo e consequente destruição dos agregados, maior fragmentação e incorporação dos resíduos vegetais e diminuição da cobertura do solo, que resultam em alterações na temperatura, umidade e aeração do solo.

### ***2.3.4 Estabilidade dos agregados***

Os agrupamentos das partículas primárias do solo dão origem aos agregados, que se unem para formar um arranjo conhecido como estrutura. A estrutura é considerada um dos atributos mais importantes do solo, visto ser dinâmico e fortemente afetado por práticas de manejo, principalmente no preparo do solo. O uso de índices que quantifiquem e qualifiquem as condições estruturais em que se encontra o solo nos diferentes sistemas de manejo é importante na avaliação da qualidade do solo, indicando a sua sustentabilidade como sistema.

Os principais fatores envolvidos na formação e estabilidade de agregados do solo são: a matéria orgânica, a fração mineral, a fauna, microrganismos, raízes, agentes inorgânicos e variáveis ambientais (SALTON et al., 2008). O tamanho do agregado determina sua suscetibilidade à movimentação pelo vento e pela água, o espaço poroso e o seu arranjo, interferindo na movimentação da água, transferência de calor, aeração e porosidade (KLEIN, 2008). Solos que apresentam boa agregação possuem diâmetro maior em seus agregados, o que facilita a proteção da matéria orgânica e o melhor fluxo e armazenamento de água no solo. Em estudo sobre os efeitos de sistemas de manejo na agregação do solo, Salton et al. (2008) encontraram relação entre estabilidade dos macroagregados com o teor de C orgânico no solo.

### ***2.3.5 Resistência do solo à penetração***

A resistência do solo à penetração é uma propriedade física que limita o crescimento das raízes acarretando em redução da produtividade das culturas. No campo, a resistência à penetração é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e pela intensidade de tráfego das máquinas agrícolas, e é dependente da umidade do solo. O maior estado de compactação ocorre na região dita “cabeceira” da lavoura, onde as máquinas realizam as manobras e o estado de compactação vai reduzindo-se para o centro da lavoura (SILVA et al., 2004). Segundo Carvalho et al. (2006), valores de resistência à penetração variando entre 1,29 e 2,87 MPa não restringiram a produtividade da cultura do feijão; todavia, considerando o conceito de intervalo hídrico ótimo, Silva et al. (1994) propõem o valor de 2,0 MPa como limite crítico para o crescimento do sistema radicular.

Araújo et al. (2004) avaliando a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado e sob mata nativa, encontraram correlação positiva da resistência à penetração com a densidade do solo e negativa com a umidade do solo em ambos os sistemas de uso avaliados. Os mesmos autores obtiveram resultados indicando um aumento significativamente maior da resistência do solo à penetração com a perda de água no solo cultivado comparado ao solo sob mata nativa, fato associado às maiores densidades do solo nestes sistemas provocadas pelo tráfego de máquinas e implementos agrícola.

Portanto, a resistência à penetração é um parâmetro útil na avaliação da qualidade física do solo, pois permite identificar áreas com resistência mecânica potencialmente limitante ao crescimento das raízes e estabelecer a umidade e a densidade do solo críticas para o desenvolvimento das plantas (IMHOFF et al., 2000).

### ***2.3.6 Curva característica de água no solo***

A curva característica de água no solo é essencial em estudos de qualidade do solo com vistas a orientar as práticas de uso e o manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola. A curva característica de água no solo, portanto, é uma das principais propriedades físicas do solo e expressa a relação entre a energia com que a água está retida e o teor de água no solo (SILVA et al., 2010). A retenção de água no solo ocorre por dois processos: forças capilares e de adsorção, as quais, juntas, são chamadas forças mátricas que dão origem ao potencial mátrico do solo (LIBARDI, 2005).

A armazenagem de água no solo depende principalmente da granulometria, da estrutura do solo e do tipo de argila e teor de matéria orgânica. Além disso, o uso do solo e as práticas de manejo têm influência marcante na retenção e na variação da armazenagem de água no solo (MOTA, 2010), devido a alterarem o arrançamento das partículas que integram a matriz do solo e reduzirem o espaço poroso. As modificações provocadas pelo revolvimento alteram a estrutura do solo e conseqüentemente a distribuição do tamanho dos poros, alterando as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 2005).

Avaliando as interrelações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva característica de água de um Latossolo sob sistemas de uso, Machado et al. (2008) verificaram que as modificações nos teores de carbono orgânico do solo e da densidade do solo provocaram mudanças negativas na curva característica de água dos solos sob pousio e cultivo, caracterizando o comprometimento da qualidade física e hídrica do solo.

### **2.3.7 Índice S**

Dexter (2004a) propôs a utilização do índice S, o qual expressa a distribuição de tamanho de poros do solo e pode ser utilizado como indicativo da qualidade física do solo. Este índice é definido como a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo. Com base em sua experiência prática, Dexter (2004a) sugere o valor de S igual a 0,035 como limite entre solos de boa e má estrutura. Dessa forma valores de S maiores ou iguais 0,035 foram estabelecidos como favoráveis ao crescimento das raízes, e abaixo desse valor como restritivos. Ou seja, valores maiores que 0,035 indicam adequada distribuição de tamanho de poros e boa qualidade física do solo. De acordo com Dexter (2004a) o índice S é afetado pela textura do solo, densidade do solo e teor de matéria orgânica. Dexter (2004b) mostrou que o índice S pode explicar, em partes, a friabilidade do solo e a ruptura da estrutura dos solos afetados pelo manejo.

Há indicações de que o índice de qualidade do solo proposto por Dexter apresenta limitações para distinguir os efeitos dos sistemas de manejo de solos pertencentes à classe textural arenosa. Em estudo com o objetivo de testar a sensibilidade do índice S em relação a algumas características intrínsecas e dinâmicas de um Nitossolo e de seis Latossolos do Sul do Brasil, Streck et al. (2008) verificaram decréscimo exponencial do parâmetro S com o aumento da densidade do solo e aumento exponencial com o aumento do teor de matéria orgânica do solo. Portanto, este índice pode ser usado para comparar diferentes condições físicas e práticas de manejo do solo, visto serem estas práticas responsáveis por alterar a distribuição do diâmetro dos poros.

### **2.3.8 Condutividade hidráulica**

A condutividade hidráulica do solo é um coeficiente que expressa a facilidade com que a água é transportada através do espaço poroso do solo. Este coeficiente é dependente das propriedades do solo que têm reflexo na geometria porosa do mesmo, como distribuição de tamanho e forma de suas partículas, tortuosidade, superfície específica, porosidade etc. (LIBARDI, 2005).

A condutividade hidráulica varia com a umidade do solo sendo máxima quando o solo se encontra saturado, com todos os poros cheios de água, e diminui à medida que se reduz o teor de água do solo. Como a condutividade depende da geometria do espaço poroso, ela varia bastante de solo para solo e, também, para o mesmo solo com variações estruturais,

de compactação etc. (REICHARDT e TIMM, 2004). Para um mesmo teor de água no solo, quanto mais poroso e agregado for o solo maior será a condutividade hidráulica.

Vieira e Klein (2007), estudando o efeito residual da escarificação em um solo sob plantio direto sobre as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho distrófico típico, verificaram que o revolvimento do solo aumentou a condutividade hidráulica do solo saturado e a taxa de infiltração de água dois anos após o preparo, comprovando efeito residual. Klein e Libardi (2002a), determinando a função  $K(\theta)$  de um Latossolo Roxo, sob diferentes condições de uso e manejo, verificaram que as alterações na estrutura do solo, com aumento da densidade, redução da porosidade total e alteração na distribuição do diâmetro dos poros, diminuíram a condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo não saturado. Por ser dependente de propriedades do solo, a condutividade pode ser útil na diferenciação dos efeitos de sistemas de manejo na movimentação de água no perfil do solo.

### ***2.3.9 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros***

A permeabilidade intrínseca ao ar ( $K_{ar}$ ) é uma medida da capacidade do solo de conduzir ar em resposta a um gradiente de pressão, por um processo denominado fluxo de massa ou fluxo convectivo (LAL, 2000). A  $K_{ar}$  é fortemente influenciada pelo teor de água no solo como também da quantidade, forma, tamanho e continuidade de poros (ROSEBERG e MCCOY, 1990). Ela alcança seu valor máximo em solos secos e progressivamente decresce à medida que o solo é umedecido até alcançar um valor de zero quando o solo está próximo ou na saturação (RODRIGUES, 2009).

A permeabilidade ao ar pode ser utilizada para avaliar alterações que ocorrem na estrutura do solo em virtude da adoção de sistemas de manejo, visto que as práticas de manejo do solo têm grande impacto sobre a sua aeração. O conhecimento da quantidade de ar disponível no solo depois de realizadas as diferentes práticas de cultivo pode auxiliar os agricultores e pesquisadores a planejar com eficiência as exigências de manejo para a produção de uma dada cultura (RODRIGUES et al., 2011). Um valor de permeabilidade do solo ao ar de  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> foi sugerido como limite crítico por McQueen e Shepherd (2002).

A razão entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração (BALL et al., 1994) tem sido utilizada como uma medida da continuidade e organização dos poros com capacidade de avaliar possíveis diferenças na geometria resultantes de práticas de manejo adotadas (BLACKWELL et al., 1990). Valores mais baixos da relação refletem uma

continuidade dos poros muito reduzida por causa da compactação (MUNKHOLM et al., 2002).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local do experimento

A área avaliada quanto à qualidade física do solo está localizada na Chapada do Apodi, e tem em seu centro as coordenadas 5° 08' 04,37" S e 37° 54' 56,58" W (áreas cultivadas com mamoeiro) e 5° 08' 32,23" S e 37° 54' 07,60" W (mata nativa), a uma altitude de 145 metros, cujos atributos químicos do solo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos do solo em sistemas de manejo.

Sistema de manejo	Prof. m	pH (H <sub>2</sub> O)	P -- mg kg <sup>-1</sup> --	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	----- cmolc kg <sup>-1</sup> -----			SB	CTC <sub>t</sub>	CTC <sub>e</sub>	V -- % --	m
							Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>					
Camalhão	0,0 - 0,1	8,2	27,5	23,6	8,0	4,2	0,4	0,0	0,0	12,6	12,6	12,6	100	0
	0,1 - 0,2	7,9	12,5	20,8	6,6	3,7	0,6	0,0	1,7	10,9	12,6	10,9	87	0
	0,2 - 0,3	7,6	5,0	17,6	5,3	3,3	0,6	0,0	0,7	9,3	10,0	9,3	93	0
	0,0 - 0,3	7,9	15,0	20,7	6,6	3,7	0,5	0,0	0,8	11,0	11,7	11,0	93	0
Sulco	0,0 - 0,1	8,3	27,2	20,0	7,9	3,7	0,3	0,0	0,0	11,9	11,9	11,9	100	0
	0,1 - 0,2	7,9	29,0	16,0	6,0	3,2	0,4	0,0	0,2	9,7	9,8	9,7	98	0
	0,2 - 0,3	7,9	4,8	7,0	7,5	2,8	0,5	0,0	0,0	10,7	10,7	10,7	100	0
	0,0 - 0,3	8,0	20,4	14,3	7,1	3,2	0,4	0,0	0,1	10,8	10,8	10,8	99	0
Mata	0,0 - 0,1	7,2	11,1	33,6	8,6	3,3	0,1	0,5	0,5	12,0	12,9	12,4	92	4
	0,1 - 0,2	6,5	2,4	21,2	4,8	2,7	0,0	0,1	2,2	7,6	9,9	7,7	77	1
	0,2 - 0,3	6,4	1,3	16,0	3,7	2,3	0,0	0,1	1,9	6,0	8,0	6,0	75	1
	0,0 - 0,3	6,7	4,9	23,6	5,7	2,8	0,0	0,2	1,6	8,5	10,3	8,7	83	2

A área situa-se no estado do Ceará, município de Limoeiro do Norte (Figura 1). Neste município está localizado um dos principais polos de produção de frutas do estado, fruto das condições favoráveis de radiação solar, temperatura, luminosidade, solos e disponibilidade de água para irrigação.

O solo da área, segundo Brasil (1973), foi classificado como Cambissolo. A região, segundo Köeppen, apresenta clima quente e semiárido, com temperatura média superior a 18 °C no mês mais frio (BSw'h'). A temperatura média anual é de 28,5 °C, com mínima de 22 °C e máxima de 35 °C. A precipitação média anual é 772 mm, registrando-se uma distribuição de chuvas muito irregular no tempo. A umidade relativa média é de 62% e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm (DNOCS, 2011). Como dito anteriormente, pelo fato de a região ter um dos mais importantes polos da fruticultura do Ceará, é estratégica para a definição de políticas públicas de interesse econômico.



Figura 1 - Vista aérea das áreas onde foram coletadas as amostras de solo (C – camalhão, S – sulco, M - mata).

### 3.2 Caracterização da área experimental

Antes do plantio com mamoeiro a área era cultivada com milho e feijão na estação chuvosa. No período de escassez de chuvas era mantida apenas com vegetação espontânea típica da Caatinga. Para a implantação do pomar de mamoeiro o solo foi preparado com grade aradora, em duas passagens, na camada de 0-0,2 m.

Tradicionalmente, na região, os produtores fazem o cultivo do mamoeiro em camalhão. No entanto, o fato de o produtor também explorar bananeira (*Musa sp.*) em sua propriedade agrícola fez com que ele adotasse, ainda que experimentalmente, a prática do cultivo em sulco. No sistema de cultivo em sulco, na verdade uma estratégia do produtor, no segundo ano do ciclo do mamoeiro faz-se o plantio da bananeira, o que possibilita, ainda no segundo ano, a última colheita do mamoeiro e a primeira da bananeira. Ao final do ciclo do mamoeiro faz-se a erradicação deixando-se apenas a bananeira como cultura a ser explorada. Dessa forma, reduzem-se os custos com o preparo do solo e ganha-se tempo com a antecipação da produção de banana na mesma área de produção de mamoeiro.

Portanto, o solo foi preparado fazendo-se o levantamento dos camalhões a uma altura de 0,25 m, com enxada rotativa, e abertura dos sulcos com sulcador a 0,25 m de profundidade, ambos com 0,40 m de largura (Figura 2). O mamoeiro do grupo Formosa, variedade Tainung 01, foi implantado por transplante (após 20 dias da sementeira em

bandejas, e com três folhas formadas), em sistema de fileiras duplas com espaçamento de 2 m x 2 m x 4 m (dois m entre fileiras simples, 2 m entre plantas e 4 m entre fileiras duplas), correspondendo a 1666 plantas ha<sup>-1</sup>.

Quando da coleta de solo para fins de avaliação de sua qualidade física, o mamoeiro havia sido implantado há 5 e 11 meses no sistema em camalhão e sulco, respectivamente. No segundo ano, a bananeira seria implantada nas mesmas linhas de cultivo e no mesmo espaçamento do mamoeiro, apenas ocupando o centro entre as plantas já estabelecidas.

Os tratos culturais para o mamoeiro são os mesmos que se adotam na Chapada do Apodi, incluindo adubação de fundação com 0,2 kg de monoamôniofosfato e 4 kg de esterco bovino por cova. A adubação de cobertura iniciou-se a partir da colheita, a cada 15 dias, e foi composta por 100 kg de cloreto de potássio e 50 kg de ureia por hectare, ambos aplicados via fertirrigação. O sistema de irrigação foi do tipo microaspersão, com linha de distribuição no centro da fileira simples (Figura 2), sendo a vazão do microaspersor de 55 L h<sup>-1</sup>, com raio molhado de 2,8 m a uma pressão de serviço de 147 kPa. Em ambos os sistemas de condução a irrigação foi realizada diariamente, em um período de quatro horas, totalizando uma lâmina de irrigação de 9 mm.dia<sup>-1</sup>.

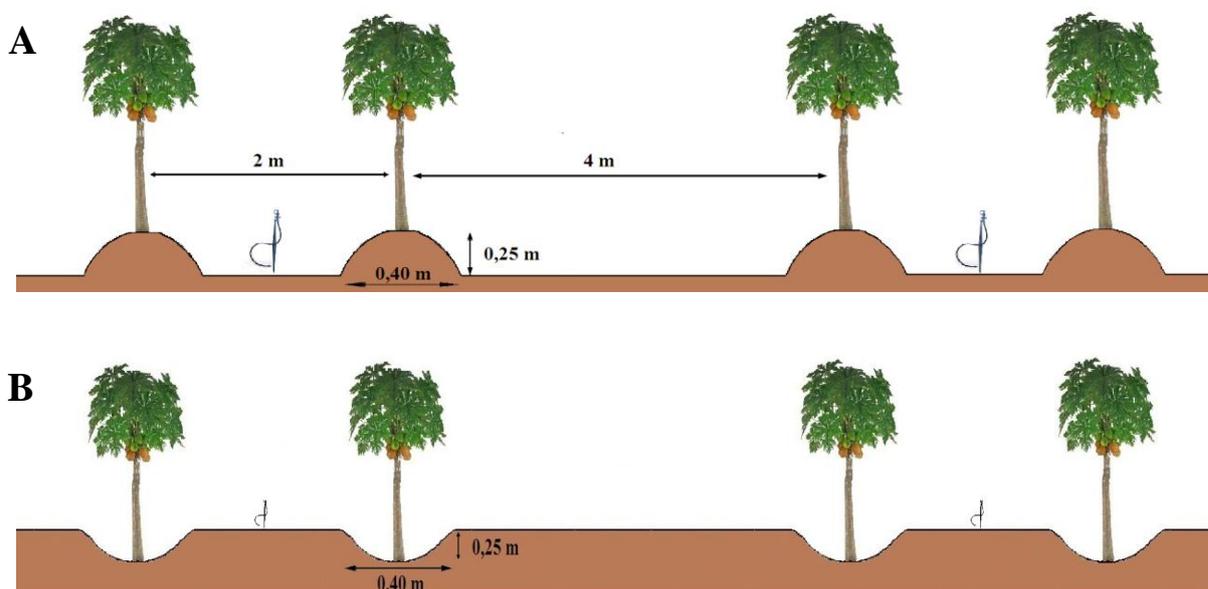


Figura 2 - Esquema ilustrativo do cultivo de mamoeiro em camalhão (A) e sulco (B).

### 3.3 Amostragem

Para fins de avaliação da qualidade física do solo foram contempladas as duas formas de manejo do solo (plantio do mamoeiro em sulco e camalhão) e uma situação de mata

nativa secundária até a profundidade de 0,3 m, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. A área de mata nativa dista cerca de 1600 m das áreas cultivadas.

Foram coletadas amostras de solo com estruturas deformada e indeformada nas camadas citadas anteriormente, considerando para o solo cultivado a parte central do sulco ou camalhão conforme o caso. As amostras com estrutura indeformada foram coletadas utilizando amostrador tipo Uhland, em anéis de aço com dimensões de 0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro. Após coleta e identificação, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará – UFC, para a realização das análises cujos procedimentos adotados são os que seguem, com cinco repetições.

### **3.4 Atributos analisados**

#### ***3.4.1 Densidade do solo***

Determinada em amostras de solo com estrutura indeformada, coletadas com amostrador tipo Uhland e secas a 105 °C até massa constante (BLAKE e HARTGE, 1986b).

#### ***3.4.2 Densidade das partículas***

Determinada pelo método do balão volumétrico, isto é, com base no volume de álcool gasto para completar um balão volumétrico de 50 ml que contenha no seu interior 20 g de TFSA (BLAKE e HARTGE, 1986a).

#### ***3.4.3 Granulometria***

Determinada pelo método da pipeta (GEE e BAUDER, 1986), com dispersão de 20 g de TFSA com hidróxido de sódio 1 mol L<sup>-1</sup>. As areias foram separadas em peneira de malha 0,053 mm de diâmetro e fracionadas segundo a classificação granulométrica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). O silte e a argila foram separados por sedimentação, conforme a Lei de Stokes.

#### 3.4.4 Argila dispersa em água

Mesmo método adotado para a análise granulométrica, suprimindo apenas o dispersante químico.

#### 3.4.5 Grau de floculação

Foi obtido com base na equação abaixo:

$$GF = \left( \frac{\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}}{\text{argila total}} \right). \quad (1)$$

#### 3.4.6 Carbono orgânico

Foi feita a oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio, em presença de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e aquecimento externo, e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal. Com este procedimento determinou-se o carbono orgânico e, a partir dele, multiplicou-o pelo fator 1,724, encontrando a quantidade de matéria orgânica (YEOMANS e BREMNER, 1988).

#### 3.4.7 Porosidade

Calculou-se com base na equação abaixo:

$$\alpha = \left( 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right), \quad (2)$$

sendo  $\alpha$  a porosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $\rho_p$  a densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e  $\rho_s$  a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ). A macroporosidade (poros com diâmetro  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) foi determinada em funil de Haines, mediante a aplicação de tensão de 6 kPa sobre as amostras, até que a água que ocupava estes poros fosse drenada (DANIELSON e SUTHERLAND, 1986). A macroporosidade foi calculada por diferença entre a porosidade total e o volume de poros de tamanho inferior a  $50 \mu\text{m}$  de diâmetro.

### 3.4.8 Curva característica de água no solo

O teor de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo; para os pontos de baixas tensões (0, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa) foi obtido mediante o uso do funil de Haines. Os demais pontos (33, 100, 300, 700, 1000 e 1500 kPa) em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). O ajuste da curva foi feito pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\phi_m|)^n\right]^m}, \quad (3)$$

em que  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\phi_m$  o potencial mátrico da água no solo (kPa),  $\alpha$  (escalador do  $\phi_m$ ),  $m$  e  $n$  (relacionados ao formato da curva). Utilizou-se o software SWRC, versão 2.0, fixando-se as variáveis  $\theta_s$  e  $\theta_r$  com os valores de umidade do solo medidos em laboratório na saturação e na tensão de 1500 kPa, respectivamente. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  foram ajustados pelo método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro  $m$  com o  $n$  (DOURADO NETO et al., 2000).

Para a construção do gráfico da frequência acumulada de poros, relacionou-se o logaritmo da tensão com o quociente entre a umidade base volume e porosidade total, sendo utilizada para cada tensão a respectiva umidade obtida pela curva característica de água no solo.

### 3.4.9 Índice S

Dexter e Czyz (2007) sugerem que, a partir da equação de van Genuchten, pode-se escrever o teor de água gravimétrico ( $u$ ) como uma função do potencial mátrico:

$$u = (u_{sat} - u_{res}) \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m} + u_{res}. \quad (4)$$

Por meios de manipulações matemáticas da equação (4), é possível simplificar o cálculo do S. Primeiramente, deve-se derivar essa equação duas vezes em relação ao logaritmo da tensão ( $\ln h$ ) e, igualando-a a zero, obtém-se o módulo do potencial de água ( $h_i$ ) no ponto de inflexão como sendo:

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{1}{m} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Aplicando-se na equação 4 o resultado obtido na equação 5, tem-se o teor de água no ponto de inflexão ( $u_i$ ) dado por:

$$u_i = (u_{sat} - u_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + u_{res} \quad (6)$$

Dessa forma, a inclinação no ponto de inflexão (índice S) pode ser calculada em termos dos parâmetros da equação de van Genuchten:

$$S = -n(u_{sat} - u_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (7)$$

Um novo índice foi sugerido com base no valor do índice S proposto por Dexter (2004a), aqui denominado de  $S_{relativo}$ . O Índice  $S_{relativo}$  é definido como a razão entre o valor do S obtido com a curva característica de água no solo para o manejo considerado e o S de referência. O S utilizado como referência foi obtido a partir da curva característica de água para o solo da mata nativa secundária, construída com solo com estrutura deformada, tomando-se uma amostra de terra fina seca ao ar (TFSA), acondicionada em anéis com mesmas dimensões daqueles utilizados para a obtenção da curva característica de água no solo com estrutura não deformada, cuja disposição foi feita de modo que as partículas se arranjassem normalmente sem a necessidade de preestabelecer um valor de densidade. O objetivo do uso da TFSA foi a simulação de um solo em que a retenção de água seja influenciada apenas pelo arranjo das partículas em função da textura do solo. Desta forma, o  $S_{relativo}$  possibilita separar o efeito da porosidade estrutural na curva característica de água do solo. Quanto maior o  $S_{relativo}$  entre os sistemas avaliados, melhor é a qualidade física do solo. Em síntese, valor de  $S_{relativo}$  acima e abaixo da unidade indica, respectivamente, melhora e piora da estrutura do solo em relação à situação de referência; valor de  $S_{relativo}$  igual à unidade indica que a estrutura do solo não foi alterada em relação à situação de referência.

$$S_{relativo} = \frac{S_{estrutura \ não \ deformada}}{S_{estrutura \ deformada}} \quad (8)$$

As curvas para as amostras com estrutura deformada (curva de referência) foram ajustadas pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), também utilizando o software SWRC, versão 2.0. Fixou-se a variável  $u_r$  com o valor de umidade à base de massa à tensão de 1500 kPa. A variável  $u_s$  foi estimada por regressão e sem restrição. Já os parâmetros

$\alpha$ ,  $m$  e  $n$  foram estimados pelo método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro  $m$  com o  $n$  (DOURADO NETO et al., 2000).

#### 3.4.10 Estabilidade de agregados

Adotou-se o método por via úmida para medir a quantidade e distribuição do tamanho dos agregados que são estáveis em água, relacionando-os com os que não se desintegram pela tamisação (KEMPER e ROSENAU, 1986). As amostras foram agitadas em oscilador elétrico vertical, composto por dois conjuntos de peneiras com malhas de 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm de abertura. Com o objetivo de estimar o diâmetro médio ponderado (*DMP*), o teor de agregados em cada peneira foi expresso em cinco classes de diâmetro, a saber: 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm e 0,50-0,25 mm, pela equação

$$\% \text{ de agregado estáveis por classe} = \left( \frac{M_a - M_p}{M_s - M_w - \Sigma M_p} \right) \cdot 100, \quad (9)$$

sendo  $M_a$  a massa dos agregados aparentes na classe,  $M_p$  a massa das partículas primárias na classe,  $M_s$  a massa da amostra original antes da tamisação e  $M_w$  a massa de água na amostra original.

O diâmetro médio ponderado, introduzido por Van Bavel (1949) como um índice de agregação, foi calculado considerando a proporção em massa  $W_i$  de um determinado tamanho de fração multiplicada pelo diâmetro médio  $X_i$  dessa fração. A soma destes produtos para todos os tamanhos de frações é chamada de diâmetro médio ponderado (*DMP*).

$$DMP = \sum_{i=1}^N X_i \cdot W_i \quad (10)$$

#### 3.4.11 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

Foi determinada baseando-se no método da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946; SILVA et al., 2009; SILVEIRA et al., 2011). Pelo anel volumétrico, contendo a amostra de solo com estrutura indeformada, equilibrada nas tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 kPa, fez-se passar uma quantidade de ar correspondente a uma pressão no reservatório de 1000 Pa. Quando a pressão atingiu o valor zero, ou estabilizou quando da resistência ao fluxo de ar, mediu-se o tempo gasto para o ar passar pela amostra (todas as medidas foram tomadas

eletronicamente). O coeficiente de permeabilidade ao ar ( $k_{ar}$ ) foi determinado a partir da equação abaixo.

$$K_{ar} = \frac{2,3.L.\eta.V}{A.P_{atm}} \times |S| \quad (11)$$

sendo  $K_{ar}$  o coeficiente de permeabilidade ao ar ( $m^2$ ),  $V$  o volume do cilindro de ar ( $m^3$ ),  $\eta$  a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s),  $L$  a altura do anel volumétrico (m),  $A$  a secção transversal da amostra de solo ( $m^2$ ),  $P_{atm}$  a pressão atmosférica no nível do mar (Pa) e  $S$  o coeficiente angular da regressão linear da pressão em função do tempo.

### 3.4.12 Índices de continuidade dos poros

Um procedimento relativo à permeabilidade ao ar,  $K_{ar}$ , foi apresentado por Ball et al. (1988), usando uma forma empírica da equação de Kozeny-Carman, análoga à forma dada por Ahuja et al. (1984):

$$K_{ar} = M (\varepsilon_{ar})^N, \quad (12)$$

em que  $\varepsilon_{ar}$  é a porosidade de aeração ( $m^3 m^{-3}$ ), e  $M$  e  $N$  são constantes empíricas. O expoente  $N$  é uma função da tortuosidade de poros e área superficial, e pode ser considerado como um índice de continuidade de poros (AHUJA et al., 1984). Tornando a equação (13) em uma forma logarítmica resulta em

$$\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar} \quad (13)$$

Os valores de  $M$  e  $N$  são, portanto, estimados usando regressão linear da relação de  $\log \varepsilon_{ar}$  versus  $\log K_{ar}$ . O intercepto da reta linear com a abscissa no gráfico que relaciona a permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração no eixo de  $\log \varepsilon_{ar}$  pode ser usado como medida da porosidade bloqueada,  $\varepsilon_b$ , e é obtido da equação 13, sendo expresso por:

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N}. \quad (14)$$

Entretanto,  $\varepsilon_b$  pode ser considerado como uma estimativa da porosidade de aeração bloqueada, não fazendo parte do transporte de ar por convecção (BALL et al., 1988).

Outro índice, que neste trabalho foi chamado de  $C_p$ , foi sugerido por Groenevelt et al. (1984) para determinar se as diferenças em  $K_{ar}$  podem ser atribuídas somente às diferenças em  $\varepsilon_{ar}$  ou se elas podem ser atribuídas, em parte, a outros aspectos geométricos do espaço poroso preenchido com ar, tais como, distribuição do tamanho de poros, tortuosidade e continuidade:

$$C_p = \frac{K_{ar}}{\varepsilon_{ar}}. \quad (15)$$

### 3.4.13 Resistência do solo à penetração

Foi determinada com amostras de solo com estrutura indeformada (cilindros de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro), com teor de água correspondente a uma tensão de 10 kPa (SILVA et al., 1994) com três determinações por amostra, utilizando um penetrômetro eletrônico estático de laboratório, com velocidade constante de penetração de 0,01 m min<sup>-1</sup>, registro de uma leitura por segundo, cone com ângulo de 60° e área de 12,566 mm<sup>2</sup>, equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena et al. (1998). Foram realizadas três subdeterminações por amostra com 180 leituras por subdeterminação. A resistência à penetração foi representada pelo valor médio das 540 leituras (três subdeterminações).

### 3.4.14 Infiltração da água no solo

Foi medida na superfície do solo, com infiltrômetro de tensão (PERROUX e WHITE, 1988) nas tensões de 0 e 0,5 kPa. O ensaio de infiltração foi concluído quando, pelo menos, quatro leituras consecutivas apresentaram resultados similares, ou seja, quando o processo de infiltração da água no solo atingiu o equilíbrio estacionário. Baseado no método de Ankeny et al. (1991), a partir da medida do fluxo para duas tensões, é possível determinar a condutividade hidráulica para cada tensão aplicada, segundo as equações a seguir:

$$K_1 = \frac{q_1}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}} \quad ; \quad K_2 = \frac{q_2}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{2(q_1 - q_2)}{\Delta\tau(q_1 + q_2)}, \quad (17)$$

em que  $K_1$  e  $K_2$  são as condutividades hidráulicas para as tensões 1 e 2, respectivamente,  $q_1$  e  $q_2$  são os fluxos para as tensões 1 e 2, respectivamente,  $r$  é o raio da base do infiltrômetro,  $\Delta\tau$  é a diferença absoluta entre as tensões.

### 3.4.15 Análise dos dados

O experimento foi analisado em delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subdivididas 3x3x5 (dois sistemas de manejo do solo – plantio do mamoeiro em sulco e camalhão – e mata nativa secundária; três camadas de solo – 0-0,1 m; 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m; cinco repetições), com exceção para a condutividade hidráulica em que se adotou o esquema fatorial 3x2x5 (dois sistemas de manejo do solo e mata nativa secundária; duas tensões – 0,00 mca e 0,05 mca; cinco repetições). Considerou-se a camada de 0,0 a 0,3 m como sendo a média dos valores que compõem as camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. Todos os dados foram inicialmente analisados pela estatística descritiva clássica. Este procedimento foi aplicado para verificar a existência de valores periféricos (“outliers”) que comprometessem o comportamento médio dos parâmetros avaliados. Foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados, o F para a análise de variância e o de Tukey para a comparação de médias, todos a 5% de probabilidade.

Também foram empregadas técnicas multivariadas de análise de componentes principais (ACP) para o entendimento de como os atributos interagiram ao mesmo tempo. Foram considerados os atributos areia, argila, silte, grau de flocculação, densidade do solo, porosidade total, macroporos, diâmetro médio ponderado, % de agregados estáveis, matéria orgânica, resistência à penetração, índice S, índice  $S_{\text{relativo}}$ , permeabilidade intrínseca do solo ao ar, índice N (continuidade de poros) nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m, cujos valores originais foram normalizados para média igual 0 e variância igual a 1, a fim de compor as variáveis utilizadas na ACP. Com a ACP para esses atributos foram gerados 11 componentes.

À matriz de correlação dos atributos com os 11 componentes considerou-se o nível de significância de 5% de probabilidade para, então, selecionar os atributos tidos como significativos que apresentam alta correlação com o componente principal em que se encontram. Os atributos selecionados apresentaram correlação de no mínimo 0,6 em módulo, em pelo menos um dos componentes principais e, por este motivo, nenhum deles foi excluído. Foi feita uma nova ACP, gerando desta feita 2 componentes principais (CP1 e CP2), que explicaram 89,04% da variância dos dados originais. Para a análise de agrupamento das variáveis utilizou-se o método de Ward, com a medida euclidiana para a distância entre os casos nos grupos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Textura do solo

A composição granulométrica dos solos em estudo está apresentada na Tabela 2, em que se observa diferença na classe textural do solo sob sistema em sulco quando comparado aos sistemas em camalhão e mata para todas as faixas de profundidades. Essa diferença pode ter sido provocada pelo preparo do solo diferenciado nestes sistemas. Como os sulcos têm uma profundidade de 0,00-0,25 m, e o preparo do solo com a grade aradora foi somente até 0,20 m, então, nesta camada de solo amostrada não houve revolvimento. Vale ressaltar que a amostragem no sistema em sulco foi realizada no centro do mesmo. Ao contrário, para o sistema de manejo em camalhão, para o levantamento destes, utilizou-se o solo revolvido pelo preparo com a grade aradora.

Nos três sistemas o conteúdo de argila aumentou enquanto o conteúdo de areia diminuiu em profundidade. Comportamento semelhante foi observado por Mota et al. (2008) estudando propriedades físicas de um Cambissolo na Chapada do Apodi. Todas as classes texturais do solo sob os sistemas de manejo se enquadram como solos de textura média.

Quanto ao grau de flocculação das argilas, o solo da mata apresentou maiores valores em relação aos demais sistemas. Possivelmente, esse maior grau de dispersão das argilas nos sistemas sob camalhão e sulco tenha sido devido ao efeito do íon  $\text{Na}^+$ , proveniente da água de irrigação, presente em maior quantidade no solo destas áreas (Tabela 1). Visto que o íon sódio, devido ao seu maior raio iônico quando hidratado, aumenta a espessura da dupla camada difusa na superfície das argilas, reduzindo as forças de atração entre elas, com consequente aumento na dispersão das partículas (SPOSITO, 1989). Estudando solos caulínicos, Frenkel et al. (1978) observaram aumento na dispersão de argilas com aumento dos teores de sódio.

Freire et al. (2003) sugerem um controle criterioso da água usada na irrigação, principalmente quando a mesma tem uma elevada relação de adsorção de sódio, o que favorece a dispersão dos coloides. Quando comparado o grau de flocculação nas profundidades em estudo, não houve diferença entre estas.

Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural, grau de floculação e classe textural).

Sistema de manejo	Prof.	Granulometria						Silte	Argila	Argila natural	Grau de floc.	Classe textural
		Areia*					Total					
		MG	G	M	F	MF						
	m	----- g kg <sup>-1</sup> -----									%	
Camalhão	0,0 - 0,1	134	81	94	173	66	548	270	182	111	39	Franco-arenosa
	0,1 - 0,2	137	79	90	166	59	529	258	213	126	41	Franco-argilo-arenosa
	0,2 - 0,3	99	65	73	143	59	438	286	275	152	45	Franco-argiloso
	0,0 - 0,3	123	75	85	160	61	505	271	223	130	42	Franco-argilo-arenosa
Sulco	0,0 - 0,1	115	76	75	144	61	471	296	232	163	30	Franca
	0,1 - 0,2	92	62	60	135	73	422	312	266	172	35	Franca
	0,2 - 0,3	87	55	53	141	74	409	322	269	177	34	Franca
	0,0 - 0,3	98	65	63	140	69	434	310	256	171	33	Franca
Mata	0,0 - 0,1	235	152	99	134	33	654	221	125	57	55	Franco-arenosa
	0,1 - 0,2	135	85	82	134	47	482	249	268	114	58	Franco-argilo-arenosa
	0,2 - 0,3	121	81	65	113	45	425	276	299	130	57	Franco-argiloso
	0,0 - 0,3	164	106	82	127	42	520	249	231	100	57	Franco-argilo-arenosa

\* MG = muito grossa (2,00 – 1,00 mm); G = grossa (1,00 – 0,50 mm); M = (0,50 – 0,25 mm); F = fina (0,25 – 0,10 mm); MF = (<0,10-0,05 mm).

#### 4.2 Densidade do solo e de partículas

Com base na análise estatística, o sistema em sulco apresentou menor densidade em relação aos demais sistemas em todas as camadas (Figura 3). O sistema sob camalhão foi estatisticamente igual à mata nas camadas de 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m. Quando comparando os sistemas dentro da camada de 0,0-0,1 m, verificou-se maior densidade para a mata. O fato de a mata apresentar maiores valores de densidade pode ser devido a este local ter sido no passado explorado com o cultivo de milho em sistema de manejo não adequado (com retirada dos restos vegetais da área ou entrada de animais após a colheita para se alimentarem dos restolhos).

Mota et al.(2008) estudando propriedades físicas de solos da Chapada do Apodi cultivados com melão, encontraram para um Cambissolo, da superfície até 0,3 m de profundidade, valores de densidade do solo de 1,46 g cm<sup>-3</sup>. Comparando este valor com os obtidos neste estudo, observa-se que o sistema sob mata de 0,0- 0,2 m e sob camalhão de 0,1-0,2 m foram superiores.

Reinert et al (2001) estabeleceu valores críticos de densidade do solo em função do teor de argila. Com base em sua classificação, os sistemas sob camalhão e mata na camada de 0,0-0,1 m se enquadram na faixa de teor de argila de 0 a 20% com densidade crítica de 1,6 g cm<sup>-3</sup>, enquanto os demais tratamentos estão enquadrados na faixa de 20 a 30% de argila com densidade crítica de 1,55 g cm<sup>-3</sup>. Confrontando os valores obtidos no trabalho com os

considerados críticos para respectiva classe, observa-se inferioridade na densidade do solo das áreas em estudo, ou seja, embora os valores de densidade do solo sejam elevados ainda não atingiram o limite crítico estabelecido como referência.

Em termos de densidade do solo, pode-se considerar que os sistemas de manejos do solo sob cultivo de mamoeiro proporcionaram melhor condição física, na camada superficial, quando comparado à situação de referência, solo sob vegetação nativa.

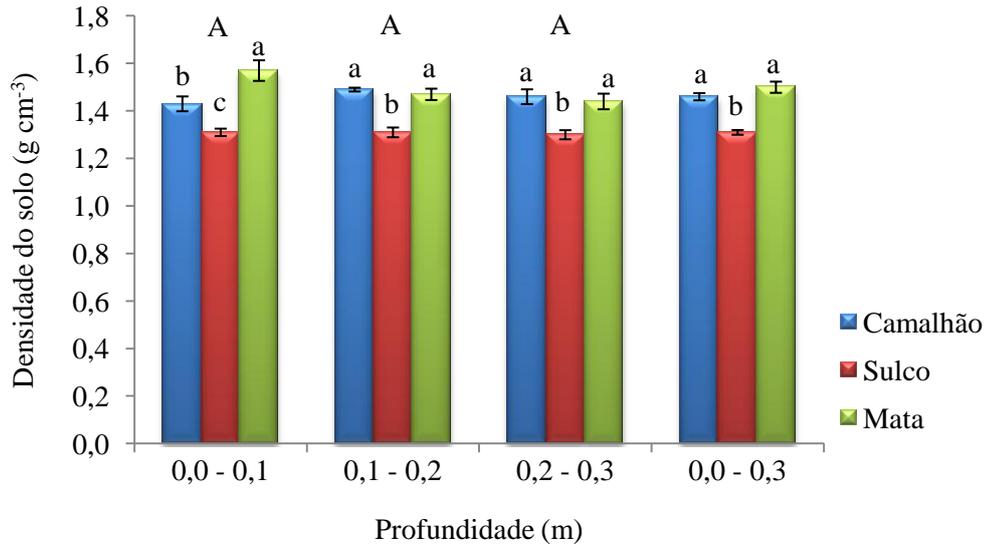


Figura 3 - Densidade do solo, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação à densidade de partícula (Figura 4), não houve diferença estatística significativa entre os sistemas nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m. Quando comparados na camada de 0,1-0,2 m e 0,0-0,3 m, o camalhão apresentou com a mata maiores valores sendo este último estatisticamente semelhante ao sulco. Essa maior densidade de partícula nos sistemas sob camalhão e mata nativa foi ocasionada pelo maior conteúdo de areia nestas áreas, visto que o principal componente desta fração é o quartzo, com densidade específica entre 2,65 a 2,66 g cm<sup>-3</sup>, o que eleva o valor da densidade das partículas.

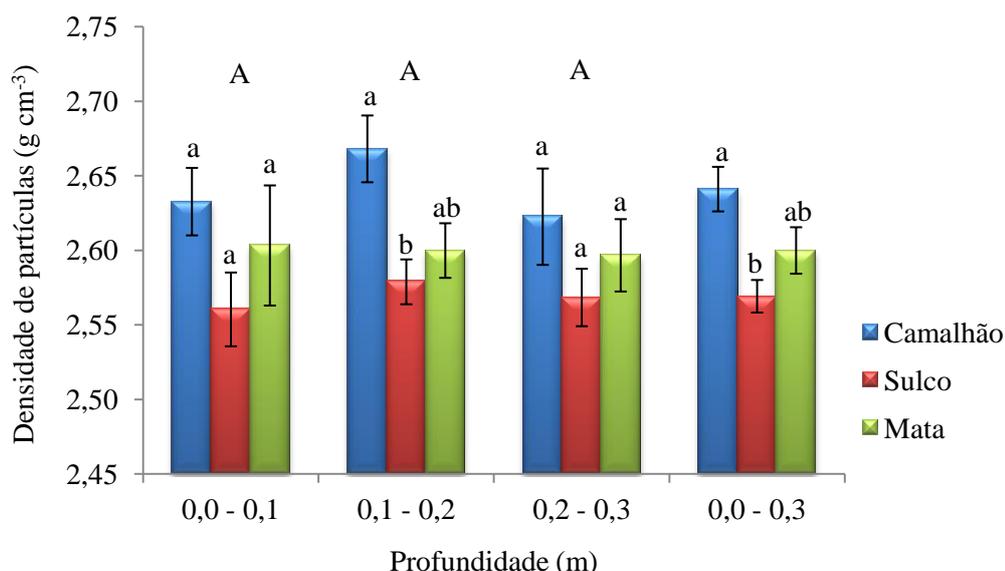


Figura 4 - Densidade de partículas, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 4.3 Agregados do solo

Pelos teores de matéria orgânica (Figura 5), os sistemas irrigados foram estatisticamente menores do que a mata na camada de 0,0-0,1 m, o que pode estar relacionado ao fato de os sistemas sob cultivo, por revolverem o solo, destruírem os agregados e favorecerem a oxidação da matéria orgânica, causando redução do teor deste agente cimentante. Nas camadas estudadas, com exceção para a camada de 0,2-0,3 m, o sistema sob camalhão foi superior ao sistema sob sulco. Isto pode estar relacionado ao fato de neste último sistema o sulco localizar-se em camada mais profunda do perfil de solo e, como se sabe, o conteúdo de matéria orgânica tende a decrescer em profundidade.

Quanto à agregação do solo, observa-se que o solo sob mata nativa tem uma maior estabilidade de agregados, de tamanho entre 2 e 4,76 mm, quando comparado às áreas sob cultivo de mamoeiro (Figura 6). Esse comportamento pode ser mais bem explicado pelo teor de matéria orgânica, que nesse sistema é bem superior aos demais, sendo mais evidente na camada superficial, de 0,0-0,1 m.

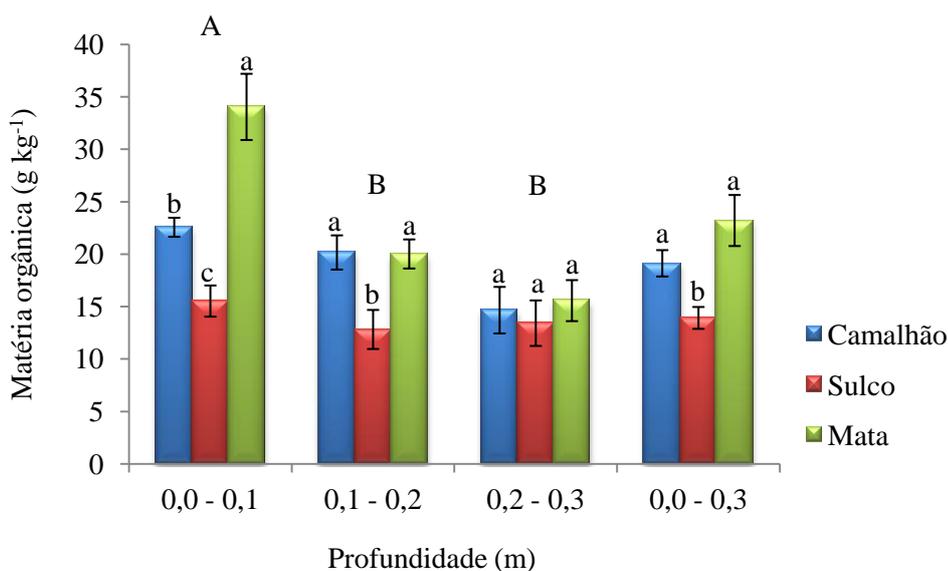


Figura 5 - Teores de matéria orgânica, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Resultado semelhante foi encontrado por Aratani et al. (2009) avaliando propriedades relacionadas à qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de uso e manejo. Os autores observaram que o manejo do solo proporcionou redução dos índices de agregação, comprovada pela perda de estabilidade dos agregados devida ao uso agrícola, em relação à mata nativa. Os mesmos justificaram que a maior agregação no sistema mata nativa foi resultante do acúmulo de matéria orgânica influenciando fortemente a agregação do solo.

O maior grau de floculação das argilas na mata comparado aos outros sistemas favoreceu a uma maior agregação das partículas do solo, que, segundo Ferreira (2010), é uma condição necessária para estabilização do agregado. Desta forma, a mata nativa mostra-se mais resistente aos processos de erosão hídrica, quando comparada aos demais sistemas. Portanto, o solo das áreas sob cultivo de mamoeiro deve ser manejado de modo que promova o acúmulo de matéria orgânica no perfil e, conseqüentemente, resultando em maior estabilização dos agregados.

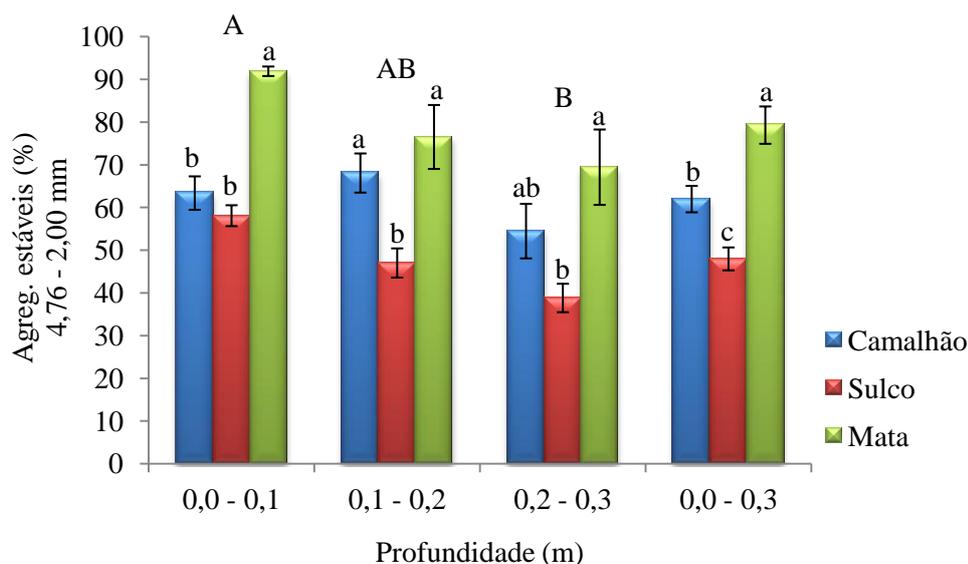


Figura 6 - Estabilidade dos agregados (4,76-2,00 mm) em água, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No que se refere aos valores de DMP, os sistemas irrigados obtiveram menor índice de agregação do solo comparado à mata na camada superficial e na camada de 0,0-0,3 m (Figura 7). Quando se analisam as camadas de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m de profundidade, o sistema cultivado em camalhão se iguala ao sistema sob mata e ambos superam o sistema sob cultivo em sulco, com exceção da última camada em que o sulco não difere do sistema em camalhão. Comparando-se as profundidades, observou-se que as camadas superficiais (0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m) foram superiores à camada mais profunda (0,2-0,3 m), sendo este comportamento semelhante ao do índice de estabilidade de agregados em água, em que houve redução da estabilidade com o aumento da profundidade.

Leite (2011) encontrou valores de DMP para mata nativa de 3,04 mm e 2,74 mm e para área sob cultivo de goiaba de 3,02 mm e 2,76 mm nas profundidades de 0,00-0,15 m e 0,15-0,30 m, respectivamente. Estes valores estão condizentes com os observados nesse estudo para a mata nativa, já os da área sob cultivo de mamoeiro ficaram um pouco abaixo dos apresentados pelo autor para o cultivo de goiabeira.

De qualquer forma, os valores de DMP para todos os sistemas de manejo permaneceram superiores a 0,5 mm, valor considerado por Kiehl (1979) como limite entre baixa e alta estabilidade. Do mesmo modo que o teor de matéria orgânica contribuiu para uma maior estabilidade dos agregados, possivelmente também concorreu para aumentar o tamanho

dos agregados. Pelos valores dos índices de agregação, os sistemas sob cultivo de mamoeiro proporcionaram redução na agregação das partículas do solo.

Assim, torna-se evidente que o revolvimento do solo por operações como o preparo do solo (aração, gradagem etc.), sendo feito em más condições de umidade, causa destruição dos agregados do solo, reduzindo o tamanho e estabilidade dos mesmos. Portanto, operações no solo devem ser feitas quando o mesmo estiver com consistência friável, pois, caso contrário, poderá causar degradação de sua estrutura.

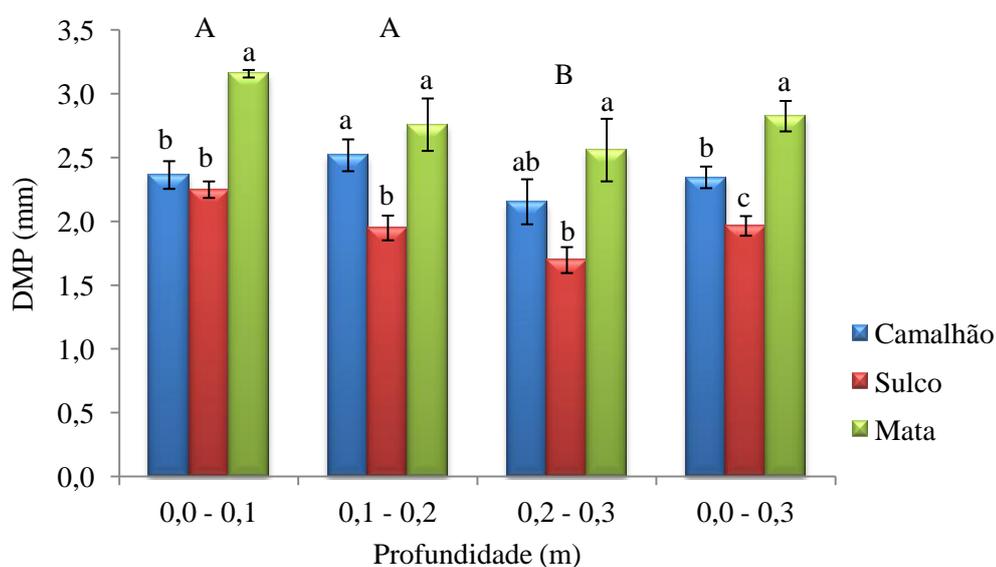


Figura 7 - Diâmetro médio ponderado, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.4 Resistência do solo à penetração

Comparando os valores de resistência à penetração (Figura 8) nos sistemas de manejo e profundidades, observa-se que na camada de 0,0-0,1 m o solo da mata mostrou maior resistência à penetração em relação aos demais sistemas. De acordo com Tormena et al. (2002), a resistência do solo à penetração integra os efeitos da densidade e da umidade nas condições físicas do solo necessárias para o crescimento das raízes. Como a medida da resistência à penetração foi realizada em uma mesma umidade para todos os tratamentos, a densidade do solo foi o fator que contribuiu para a maior média obtida na mata, tendo em vista que este sistema apresentou maior densidade na camada ora considerada. Ciclos de

umedecimento e secagem provocados pela irrigação, além de ações mecânicas como a aração e a gradagem, favoreceram melhor estruturação e contribuíram para os menores valores de densidade e, conseqüentemente, para a menor resistência à penetração nas áreas sob cultivo.

Na camada de 0,1-0,2 m não houve diferença estatística significativa enquanto que nas camadas de 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m o sulco e a mata, respectivamente, revelaram maior resistência que o camalhão. De acordo com Giarola et al. (2007), a presença de argila dispersa em água pode contribuir para o aumento da resistência à penetração. Este deve ter sido um dos motivos pelos quais o sistema em sulco teve superioridade sobre os demais, haja vista que nesta camada os valores de argila dispersa em água foram elevados, além de um baixo grau de floculação e diâmetro médio ponderado, o que contribuiu para uma pior estruturação e conseqüente aumento da resistência à penetração.

Quando comparando as camadas, observa-se aumento da resistência em profundidade. Isso pode ser resultado da deposição de partículas finas das camadas superiores para as inferiores visto que há um aumento de silte e argila dispersa em água em profundidade. A resistência à penetração nos tratamentos em estudo não atingiram o limite crítico para o desenvolvimento de plantas, 2,0 MPa (SILVA et al., 1994).

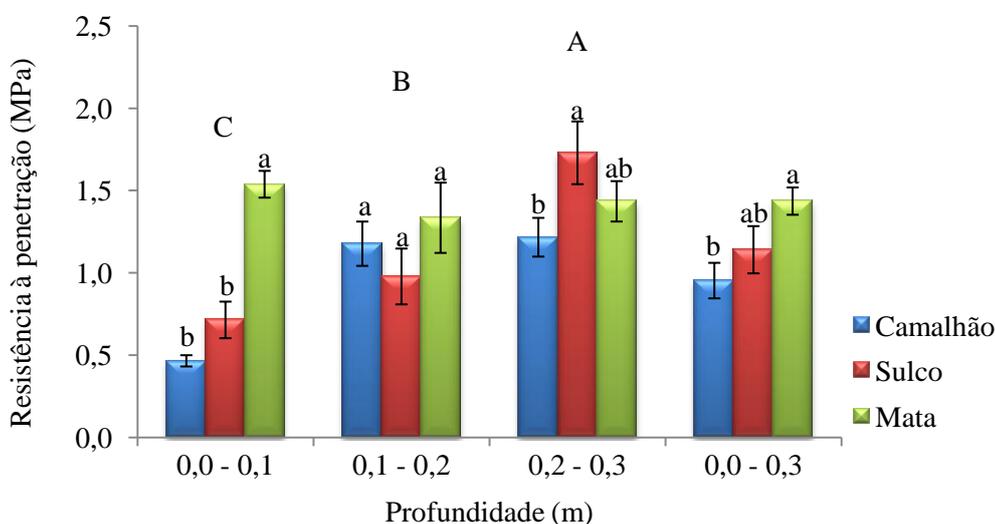


Figura 8 - Resistência do solo à penetração, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.5 Curva característica de água no solo e frequência acumulada de poros

A Figura 9 contém as curvas características de água no solo para os sistemas nas profundidades em estudo, em que é possível observar que do ponto em que a tensão é 0 até por volta de 6 kPa (faixa de tensão em que a água está contida nos macroporos), o sistema sob camalhão na camada de 0,0-0,1 m apresentou maior capacidade de retenção de água nesta faixa de tensão. Para este mesmo intervalo (0 a 6 kPa), os tratamentos do sistema mata obtiveram menores retenções com destaque para a camada superficial, reflexo de sua elevada densidade do solo e menor macroporosidade em relação aos sistemas sob cultivo.

Na outra faixa de tensão, de 6 a 1500 kPa (faixa de tensão em que a água está contida nos microporos), os tratamentos apresentaram maior semelhança, com exceção apenas para o sulco 0,0-0,1 m, que apresentou menor retenção de água para esta faixa e com uma maior capacidade de água disponível em conjunto com a camada 0,1-0,2 m do mesmo sistema.

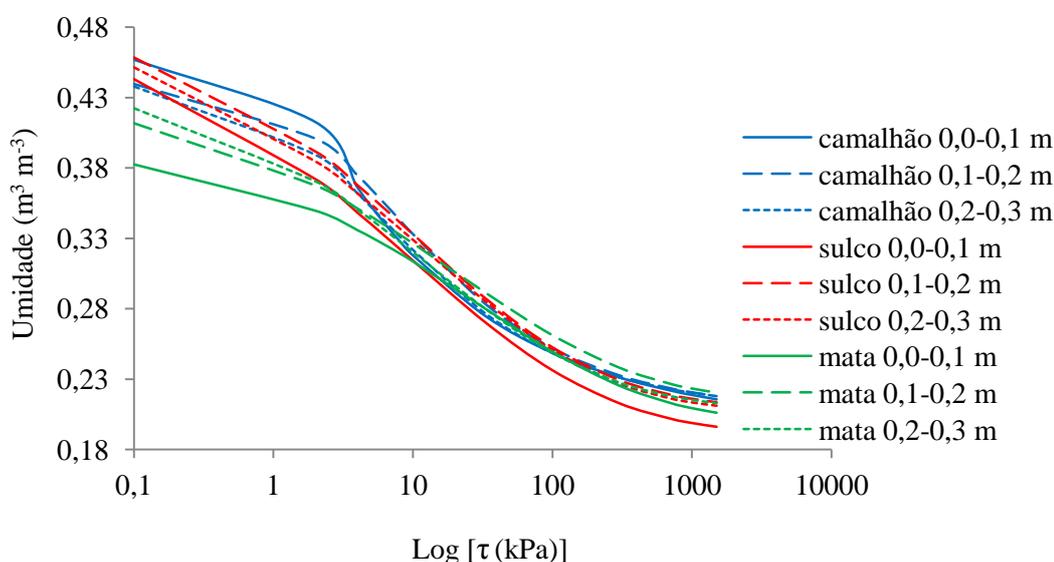


Figura 9 - Curvas características de água no solo para os sistemas de manejo em sulco e camalhão e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

Analisando a frequência acumulada de poros dos tratamentos em estudo (Figura 10), observa-se que no intervalo de 2 a 1500 kPa de tensão o sistema sob mata nativa, principalmente as camadas superficiais, manteve-se superior aos sistemas sob cultivo, sendo estes últimos bastante semelhantes. Pode-se assegurar que em uma situação em que a tensão da água no solo seja de 10 kPa, tensão correspondente à capacidade de campo e de referência

para o manejo de água em solos irrigados, ocorrerá esvaziamento de aproximadamente 20% da porosidade total do solo da mata nativa e 30% do solo das áreas cultivadas com mamoeiro. Ou seja, para uma mesma tensão os sistemas sob cultivo proporcionam um maior volume disponível ao fluxo de ar comparado à mata nativa.

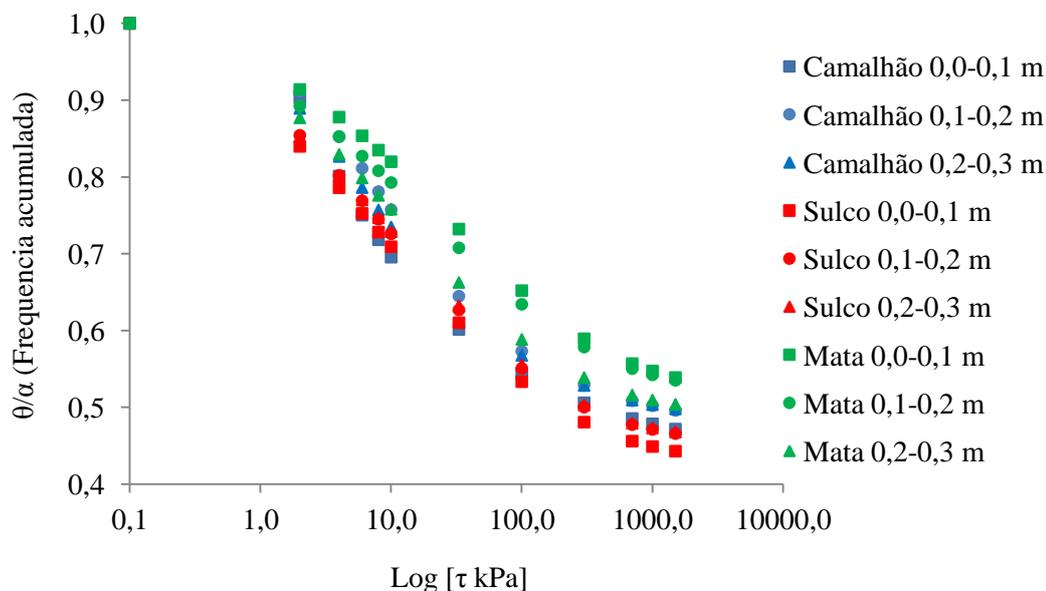


Figura 10 - Frequência acumulada de poros para os sistemas de manejo em sulco e camalhão e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

#### 4.6 Índices S e $S_{\text{relativo}}$

De acordo com a Figura 11, o índice S apontou o solo cultivado com mamoeiro como o de melhor qualidade física em relação à mata nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,0-0,3 m. Todas as camadas do solo sob cultivo de mamoeiro apresentaram valores maiores que 0,035, valor preconizado por Dexter (2004a) como limite crítico, acima do qual o solo tem uma boa qualidade física com todas as condições propícias ao crescimento das raízes. Para o sistema mata nativa, apenas na camada de 0,2-0,3 m o valor do índice S foi superior a 0,035 enquanto que nas outras camadas os valores de S situaram-se entre 0,020 e 0,035. Este limite foi estabelecido pelo mesmo autor como indicativo de solos de condições físicas pobres e com alta restrição ao crescimento das raízes das plantas.

Leite (2011), em estudo sobre a qualidade física de um Cambissolo na Chapada do Apodi – CE, encontrou valores de S para área cultivada com goiabeira irrigada de 0,031 e 0,029 para as camadas de 0,00-0,15 m e 0,15-0,30 m, respectivamente. Confrontando com os valores aqui obtidos, é notória a diferença, visto que estes valores ficaram abaixo do limite

crítico estabelecido por Dexter (2004a), enquanto os do presente trabalho ficaram acima deste limite.

O sistema sob mata nativa na camada de 0,0-0,1 m obteve o menor valor de S. Possivelmente este valor está relacionado com a elevada densidade do solo apresentada por esta camada, visto serem os valores de S negativamente correlacionados com a densidade (DEXTER, 2004a; STRECK et al., 2008; CAVALIERI et al., 2009b).

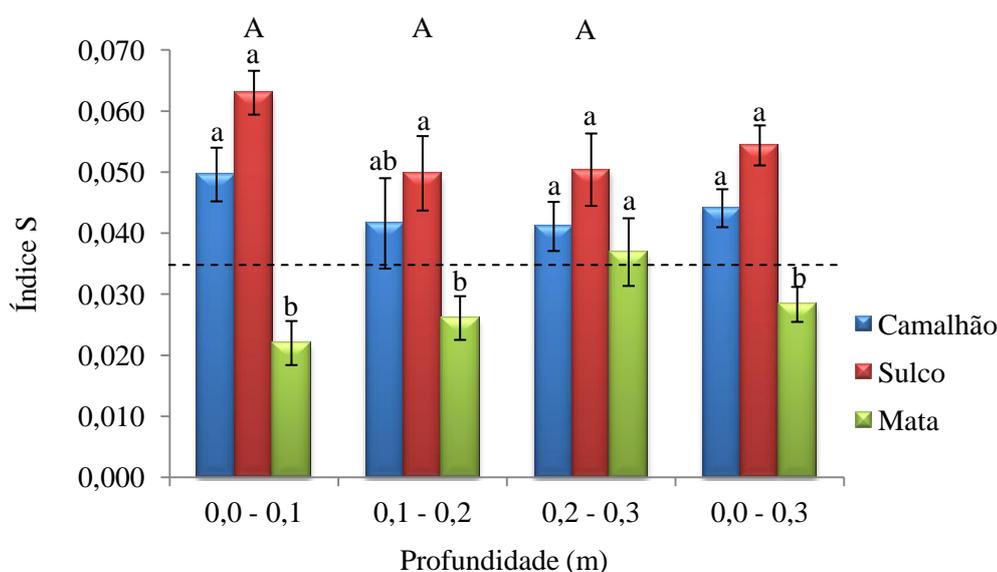


Figura 11 - Índice S, com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto ao índice  $S_{\text{relativo}}$  (Figura 12) verificou-se diferença significativa entre os sistemas, sendo as áreas sob cultivo de mamoeiro estatisticamente superiores à área de mata nativa nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,0-0,3 m. Apenas na camada de 0,2-0,3 m não houve diferença estatística entre os sistemas para a variável em questão. Diferentemente do índice S, o  $S_{\text{relativo}}$  detectou diferença estatística significativa entre as camadas, sendo a camada superficial a que apresentou maior valor comparativamente às camadas subjacentes. Quantitativamente, os sistemas sob camalhão e sulco na camada de 0,0-0,1 m melhoraram a qualidade física do solo em 10 e 40%, respectivamente, enquanto os demais tratamentos não apresentaram melhora na qualidade física do solo em relação à referência.

O índice  $S_{\text{relativo}}$ , apresentado nesse estudo como uma proposta de um índice de qualidade física do solo, mostrou ser sensível para distinguir os sistemas de manejo do solo e até mesmo profundidades de um mesmo sistema. Portanto, a partir deste indicador, a resposta

do solo ao manejo, seja em sulco ou camalhão, traduzida pela melhoria de sua qualidade física, é melhor quando comparada à situação em que se encontra o solo sob mata nativa secundária.

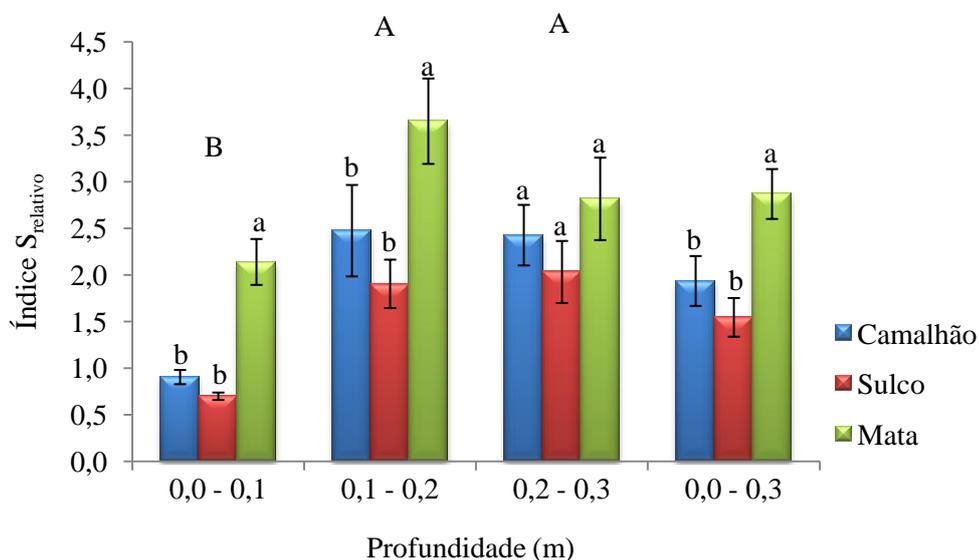


Figura 12 - Valores de Índice  $S_{\text{relativo}}$ , com os desvios-padrão da média, para as áreas cultivadas com mamoeiro e mata nativa (dados transformados para  $1/x$ ). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula entre profundidades, e pela mesma letra minúscula na mesma profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.7 Condutividade hidráulica do solo

Analisando o gráfico do log da condutividade hidráulica do solo (Figura 13) em função da tensão com que a água se encontra no solo, observa-se diferença estatística significativa para as duas tensões em estudo. Na tensão de 0 hPa (condutividade hidráulica em solo saturado), os sistemas em sulco e camalhão apresentaram maior condutividade, sendo este último semelhante à do solo sob mata. De acordo com a classificação Soil Survey Staff (1993) para a condutividade hidráulica em solo saturado, todos os sistemas se enquadram na classe alta (36 a 360  $\text{mm h}^{-1}$ ). Este comportamento do solo quanto à condutividade hidráulica em condição de saturação é muito bom, pois, como se tratam de áreas irrigadas, é necessário que o solo conduza água no mínimo com a mesma intensidade com que ela chega a sua superfície, evitando, assim, problemas relacionados com a erosão.

Para a tensão de 5 hPa os sistemas em camalhão e sulco mantiveram-se superiores à mata. É perceptível que com um pequeno acréscimo na tensão ou decréscimo na umidade a condutividade hidráulica cai de maneira brusca, efeito da relação exponencial entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo. Os valores de condutividade hidráulica são

muito superiores à lâmina de irrigação aplicada nas áreas sob cultivo,  $2,25 \text{ mm h}^{-1}$ , o que indica que não há risco de escoamento superficial e consequentemente erosão, pelo uso da irrigação.

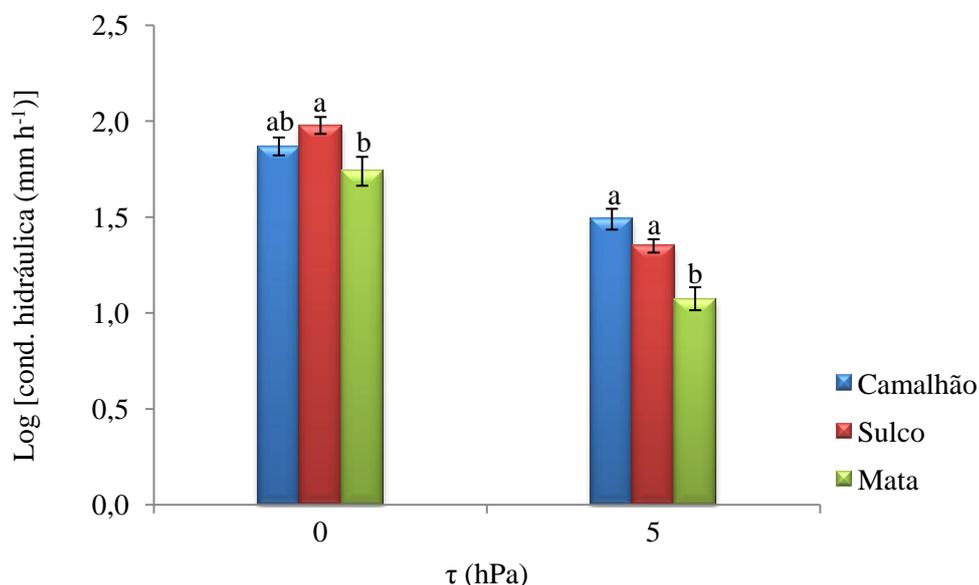


Figura 13 - Condutividade hidráulica da superfície do solo, com desvios-padrão da média, para os sistemas de manejo em sulco e camalhão e sob mata nativa. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma tensão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.8 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros

A análise estatística para a permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) revelou ter o solo cultivado sob camalhão mais área disponível ao fluxo de ar em relação à mata nativa, sendo o sistema em sulco semelhante a ambos (Tabela 3). Os valores do índice de continuidade de poros,  $C_p$ , em consonância com a permeabilidade ao ar, contribuíram para a superioridade do sistema de cultivo em camalhão sobre a mata nativa. Outro fator que pode ter favorecido essa superioridade das médias dos sistemas de cultivo é a macroporosidade que foi maior nesses sistemas em relação à mata.

Houve uma tendência de redução da  $K_{ar}$  em profundidade para os sistemas cultivados; o mesmo não ocorreu para a mata, em que todas as camadas foram semelhantes. Comportamento semelhante aos apresentados pelos sistemas cultivados foram obtidos por Cavalieri et al. (2009b), em um Latossolo Vermelho em cultivo com sistema de plantio direto, e por Rodrigues et al. (2011), em cultivo convencional e em sistema de plantio direto. Isto pode ser explicado devido ao sistema sob cultivo ter as camadas superficiais revolvidas, o que

não ocorreu na camada de 0,2-0,3 m. Já o sistema sob mata nativa, mais estável, por não haver revolvimento do solo, contribuiu para não manifestar esse comportamento.

Com o aumento da tensão, os valores de  $K_{ar}$  também aumentaram, sendo mais evidente da tensão de 2 para a de 6 kPa em que todos os tratamentos apresentaram diferença estatística significativa. Isto pode ser explicado pelo fato de, com o aumento da tensão, para esta faixa, serem esvaziados os poros de maior dimensão (macroporos), que são os que mais contribuem para o fluxo de ar no solo. Para o solo das áreas cultivadas, comparando-se os valores de  $K_{ar}$  nas tensões para cada camada dentro do sistema, observa-se que não há diferença estatística significativa entre as tensões intermediárias (6, 10 e 33 kPa). Ou seja, uma variação na tensão da água no solo entre 6 e 33 kPa não proporciona diferença estatística significativa na área disponível ao fluxo de ar. Comportamento semelhante ocorreu nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m do solo da mata.

Tabela 3 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) para o solo sob cultivo de mamoeiro e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m e nas tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 kPa.

Sistemas de manejo	Camadas (m)	$\tau$ (kPa)					Média	
		2	6	10	33	100		
----- $\log_{10} K_{ar}, \mu m^2$ -----								
Camalhão	0,0-0,1	1,85 A	1,59 b	1,91 a	1,93 a	1,87 a	1,93 a	1,39 A
	0,1-0,2	1,10 B	0,76 c	1,02 b	1,12 b	1,22 ab	1,38 a	
	0,2-0,3	1,22 B	0,73 c	1,19 b	1,32 ab	1,40 ab	1,45 a	
	Média		1,02 c	1,37 b	1,46 ab	1,50 ab	1,59 a	
Sulco	0,0-0,1	1,40 A	1,08 b	1,40 a	1,45 a	1,49 a	1,56 a	1,02 AB
	0,1-0,2	0,92 AB	0,42 c	0,93 b	0,95 b	1,06 ab	1,23 a	
	0,2-0,3	0,74 B	-0,07 c	0,80 b	0,93 ab	0,98 ab	1,08 a	
	Média		0,48 c	1,04 b	1,11 b	1,18 ab	1,29 a	
Mata	0,0-0,1	0,86 A	0,44 c	0,80 b	0,89 b	1,02 ab	1,17 a	0,75 B
	0,1-0,2	0,71 A	0,30 c	0,66 b	0,77 ab	0,85 ab	0,98 a	
	0,2-0,3	0,68 A	0,25 d	0,54 c	0,76 bc	0,85 ab	1,02 a	
	Média		0,33 d	0,67 c	0,81 b	0,91 b	1,06 a	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha, e mesma letra maiúscula na coluna em cada sistema, não diferem por Tukey a 5% de probabilidade; para a média geral, valores seguidos pela mesma letra maiúscula entre sistemas não diferem por Tukey a 5% de probabilidade.

A permeabilidade do solo ao ar foi positivamente relacionada com a porosidade de aeração nos sistemas de manejo e nas três camadas em estudo (0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m) conforme evidenciado na Figura 14. Nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m, maior permeabilidade ao ar foi encontrada para o sistema de cultivo em camalhão com relação aos demais para uma mesma porosidade de aeração. Na profundidade de 0,1-0,2 m os sistemas sob cultivo de mamoeiro superaram a mata nativa.

Conforme a teoria do intervalo hídrico menos limitante (SILVA et al., 1994), o limite crítico de aeração para o desenvolvimento das plantas é de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Partindo deste pressuposto, verifica-se que para o valor de  $\epsilon_{\text{ar}} = 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ou  $\log \epsilon_{\text{ar}} = -1,0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na profundidade de 0,0-0,1 m, os sistemas cultivados obtiveram  $K_{\text{ar}}$  maior que  $10 \mu\text{m}^2$ , fato não observado para o solo sob mata. Para as camadas inferiores, todos os sistemas obtiveram valores de  $K_{\text{ar}}$  abaixo de  $10 \mu\text{m}^2$ , com exceção para o sistema sob camalhão na camada de 0,2-0,3 m.

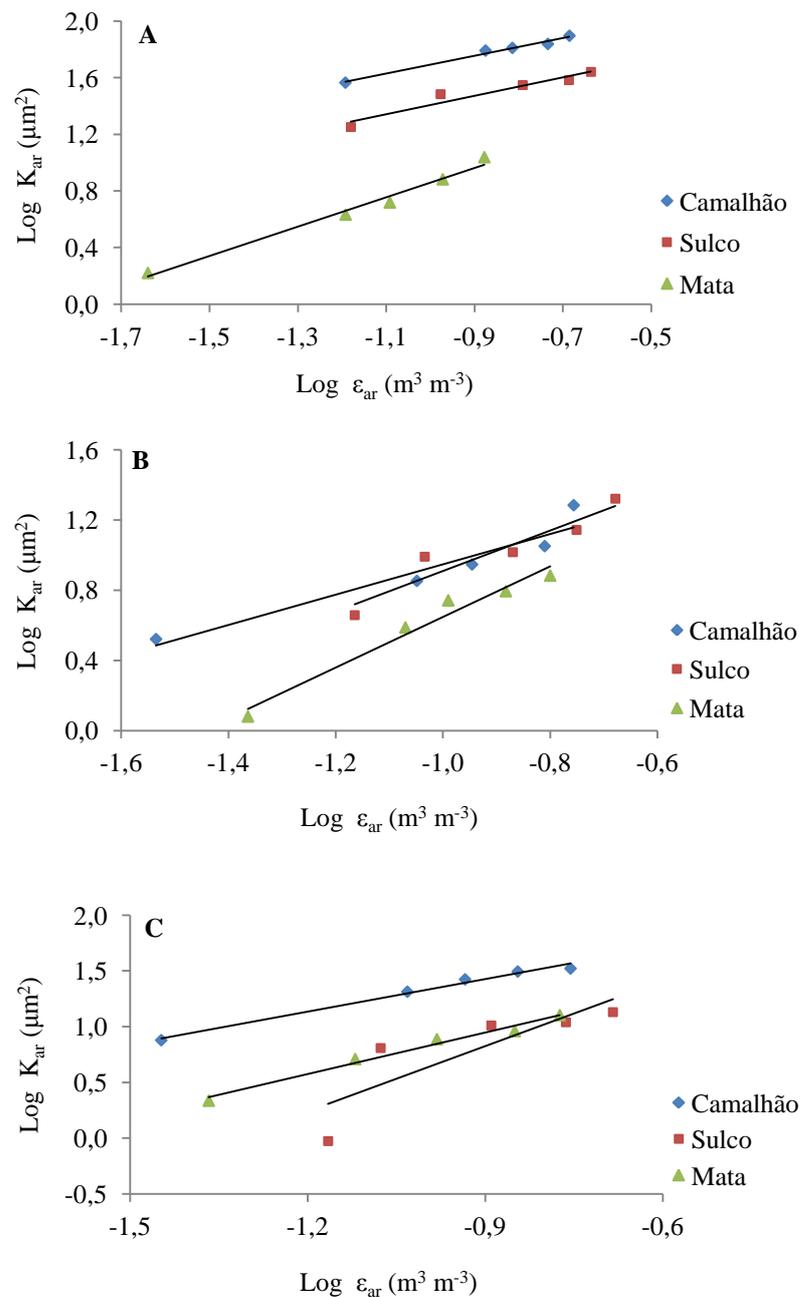


Figura 14 - Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e porosidade de aeração para o solo cultivado com mamoeiro em sistema de sulco e camalhão e sob mata nativa, nas profundidades de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).

Trabalhos como os de Ball et al. (1988), Rodrigues et al. (2011) e Schjøning et al. (2002) também revelaram valores de  $K_{ar}$  baixos para uma porosidade de aeração de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com alguns casos próximos à porosidade de aeração bloqueada. Desta forma, na avaliação da aeração do solo deve-se levar em consideração, além dos poros preenchidos com ar, a permeabilidade do solo ao ar, pois não basta somente o solo estar com  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de poros preenchidos com ar. Muito mais importante que esta condição é que os poros do solo estejam bem conectados para promover boa condução de ar e adequada troca gasosa entre este e a atmosfera, possibilitando que as atividades biológicas sejam realizadas satisfatoriamente.

A variação da  $K_{ar}$  com o aumento da tensão da água no solo ocorreu de forma logarítmica para todas as camadas e sistemas de manejo (Figura 15). Observa-se que a  $K_{ar}$  na camada de 0,0-0,1 m para uma tensão de 10 kPa (tensão correspondente à capacidade de campo, pelo menos sob as condições de contorno estabelecidas para o intervalo hídrico ótimo) foi de aproximadamente  $30 \mu\text{m}^2$  e  $60 \mu\text{m}^2$  para os sistemas de cultivo em sulco e camalhão, respectivamente. Quando se aumenta a profundidade, 0,1-0,2 m, a permeabilidade ao ar na capacidade de campo decresce bruscamente obtendo valores de  $10 \mu\text{m}^2$ . Na última camada a permeabilidade do solo ao ar no sistema sob sulco decresce ainda mais chegando a  $5 \mu\text{m}^2$ , igualando-se à mata que obteve este valor em todas as camadas. Na mata os valores de  $K_{ar}$  estão bem próximos à permeabilidade crítica ( $1 \mu\text{m}^2$ ), portanto considerada não funcional.

Os valores de N, Tabela 4, apontam superioridade da mata em relação às áreas cultivadas nas duas primeiras camadas (0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m) enquanto que na camada mais profunda o sulco tem uma maior continuidade de poros em relação aos demais sistemas. Quando comparando os valores de N entre as profundidades dentro de cada sistema, observa-se que a continuidade de poros aumenta em profundidade. Conforme Schjøning et al. (2002), um maior valor de N pode ser interpretado como solo de estrutura complexa; portanto, valores de 0,97 para o camalhão e 1,95 para o sulco na camada de 0,2-0,3 m demonstram diferenças na complexidade da estrutura desse solo. Decerto, a diferença no modo como foi construído o camalhão e o sulco no preparo do solo acarretaram diferentes estruturas nestes sistemas para esta profundidade.

Os valores de  $\varepsilon_b$  revelam que a mata tem um maior volume de poros de aeração bloqueados nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m enquanto que o sistema de cultivo em sulco foi superior na camada de 0,2-0,3 m. Vale ressaltar os baixos valores de  $\varepsilon_b$  na camada superficial dos sistemas de cultivo, chegando a  $\varepsilon_b$  ser ausente no sistema sob camalhão. O contrário ocorre na camada de 0,2-0,3 m do sistema sob sulco com quase 5% da porosidade de aeração indisponíveis ao fluxo de ar.

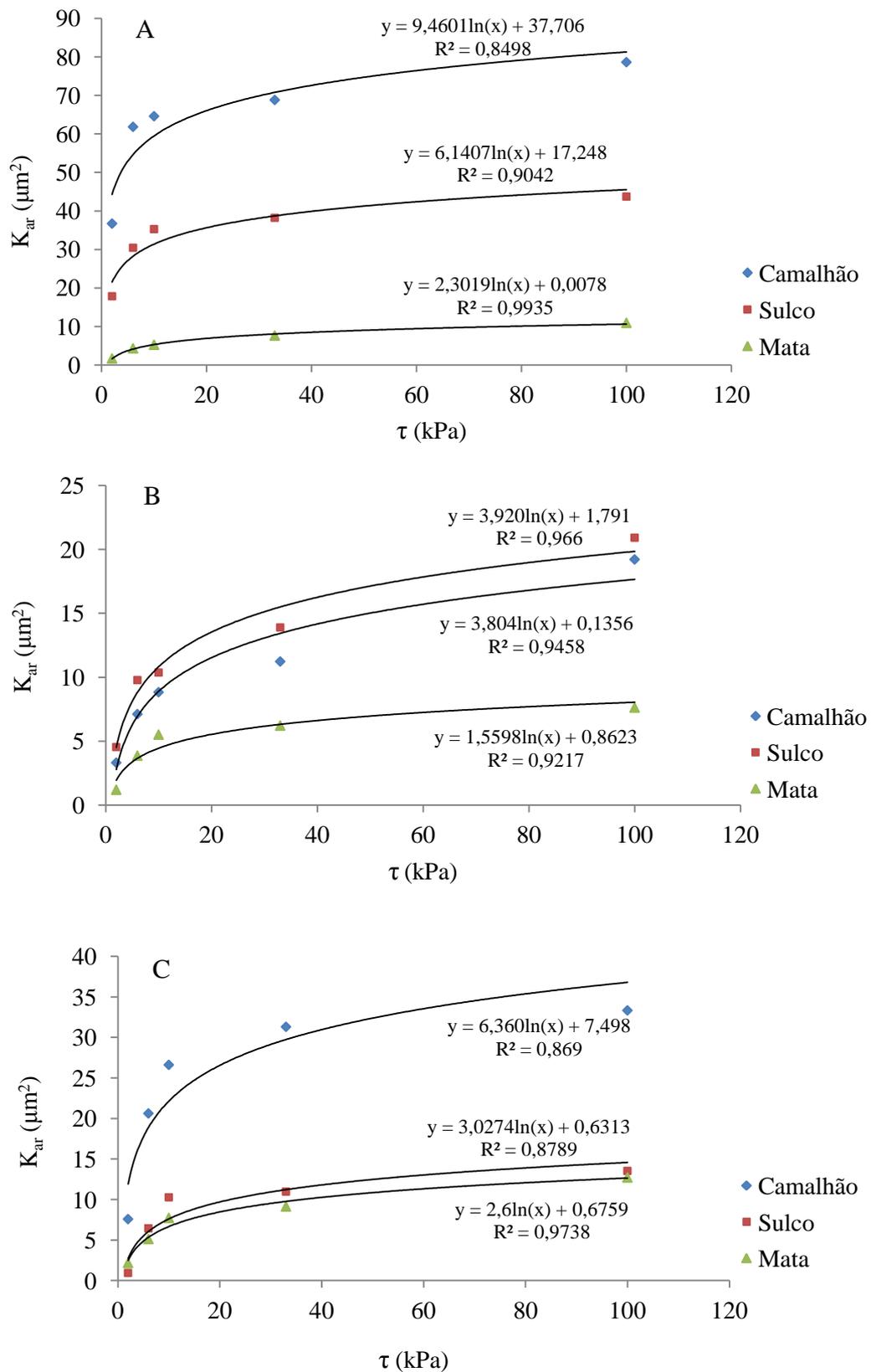


Figura 15 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar em função da tensão da água no solo em solo cultivado com mamoeiro sob sistema em sulco e camalhão e sob mata nativa, nas profundidades de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).

Tabela 4 - Parâmetros da equação de regressão de  $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$  e porosidade bloqueada  $\varepsilon_b$  para o solo sob cultivo de mamoeiro e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

Sistemas	Camadas	Log M	N	R <sup>2</sup>	$\varepsilon_b$
	m	----- v/v -----			%
Camalhão	0,0-0,1	2,32	0,63	0,98	0,0
	0,1-0,2	1,81	0,86	0,92	0,8
	0,2-0,3	2,30	0,97	0,99	0,4
Sulco	0,0-0,1	2,06	0,65	0,93	0,1
	0,1-0,2	2,06	1,15	0,9	1,6
	0,2-0,3	2,58	1,95	0,71	4,8
Mata	0,0-0,1	1,89	1,04	0,98	1,5
	0,1-0,2	2,09	1,44	0,97	3,6
	0,2-0,3	2,07	1,24	0,98	2,2

Conforme Groenevelt et al. (1984), o índice de continuidade de poros,  $C_p$ , é capaz de indicar se as diferenças nos valores de  $K_{ar}$  podem ser atribuídas somente a diferenças na porosidade de aeração ou se elas devem ser atribuídas, em parte, ao aspecto geométrico do espaço poroso preenchido com ar. Desta forma, quanto maior o valor de  $C_p$  mais contínuos serão os poros do solo.

Observando os valores de  $C_p$  (Tabela 5), verifica-se uma superioridade do sistema de cultivo em camalhão em relação aos demais sistemas para todas as tensões e camadas, sendo os valores do sistema em sulco aproximados aos da mata nativa.

Com relação à profundidade, as camadas superficiais de todos os sistemas de manejo em todas as tensões têm uma maior continuidade de poros em relação às camadas subsuperficiais. Para as áreas cultivadas, o revolvimento provocado pelo preparo do solo alterando a porosidade pode ter contribuído para a superioridade das camadas superficiais, visto que essa operação foi realizada até 0,2 m de profundidade, enquanto que para a mata o efeito do conteúdo de matéria orgânica (maior na superfície) e, conseqüentemente, da atividade biológica, possivelmente foram os responsáveis pela criação de poros mais contínuos nesta camada.

Os índices de continuidade de poros,  $N$  e  $C_p$ , comportaram-se de maneira diferente. Este comportamento pode estar relacionado com o fato de que o primeiro é resultado de uma faixa de tensão que vai de 2 a 100 kPa, ou seja tem uma maior abrangência, enquanto que o segundo é apenas pontual, com um valor para cada tensão da água no solo. A literatura traz casos semelhantes em que os índices de continuidade de poros,  $N$  e  $C_p$ , apresentam comportamento inverso (BALL et al., 1988) e (RODRIGUES et al., 2011).

Tabela 5 - Índice de continuidade de poros ( $C_p$ ) para o solo sob cultivo de mamoeiro e sob mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

Sistema	$\tau$ (kPa)	Camadas (m)		
		0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3
		----- $\log_{10} C_p, \mu\text{m}^2$ -----		
Camalhão		2,92	2,76	2,36
Sulco	2	2,38	1,78	1,13
Mata		2,53	1,86	1,67
Camalhão		2,75	2,38	2,37
Sulco	6	2,43	2,01	1,89
Mata		2,51	2,05	1,79
Camalhão		2,71	2,39	2,37
Sulco	10	2,31	1,87	1,89
Mata		2,41	2,07	1,83
Camalhão		2,65	2,35	2,35
Sulco	33	2,25	1,88	1,79
Mata		2,34	2,06	1,78
Camalhão		2,65	2,38	2,29
Sulco	100	2,26	1,99	1,80
Mata		2,32	2,03	1,86

#### 4.9 Considerações sobre os indicadores de avaliação física do solo

Os indicadores de qualidade física servem como aferidores da situação atual em que se encontra um determinado solo. Óbvio que há de se considerar uma referência para, a partir dela, fazer todas as comparações. Assim posto, as variáveis consideradas foram referenciadas com valores críticos estabelecidos na literatura, conforme descrição no parágrafo seguinte.

O valor crítico usado como referência para a condutividade hidráulica saturada foi de  $36 \text{ mm h}^{-1}$ , limite inferior da classe considerada alta pela Soil Survey Staff (1993); para a permeabilidade intrínseca ao ar foi utilizado o valor de  $1 \mu\text{m}^2$  como limite crítico (MCQUEEN e SHEPHERD, 2002); a densidade do solo crítica utilizada foi de  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$  (REINERT et al, 2001); a resistência à penetração, 2 MPa, e a porosidade de aeração,  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , foram empregadas de acordo com a teoria do IHO, conforme Silva et al. (1994). Quanto ao índice S, usou-se o limite de 0,035 proposto por Dexter (2004a) como limite entre boa e pobre qualidade física do solo; para o índice  $S_{\text{relativo}}$  proposto neste trabalho, empregou-se o valor de 1, em que acima e abaixo do mesmo houve melhora e piora, respectivamente, da qualidade física do solo em relação a situação de referência.

Para comparação com os valores de referência da literatura, foi calculada a média do conjunto de dados (45 valores) de cada atributo e sistema de manejo. Em seguida, foi

obtido um valor proveniente da razão da média do conjunto de dados pelo valor de referência. Na sequência, considerou-se a referência igual a 1.

Analisando o gráfico em modelo radar (Figura 16), é notório que para os atributos densidade do solo e resistência à penetração todos os sistemas mantiveram-se abaixo do limite crítico tido como referência. Para a condutividade hidráulica em condição de solo saturado, todos os sistemas foram superiores à referência indicando que o solo destas áreas tem uma boa capacidade de condução de água. Para o índice S, porosidade de aeração e permeabilidade ao ar, as áreas cultivadas com mamoeiro situaram-se acima da referência enquanto que a mata nativa ficou abaixo. Somente no  $S_{\text{relativo}}$  todos os sistemas ficaram abaixo da referência, indicando pior estrutura em relação à situação tida como referência. Em síntese, para todos os atributos analisados, com exceção do  $S_{\text{relativo}}$ , os solos das áreas cultivadas com mamoeiro foram melhores que o referencial, enquanto que a mata foi melhor apenas nos atributos densidade do solo, resistência à penetração e condutividade hidráulica.

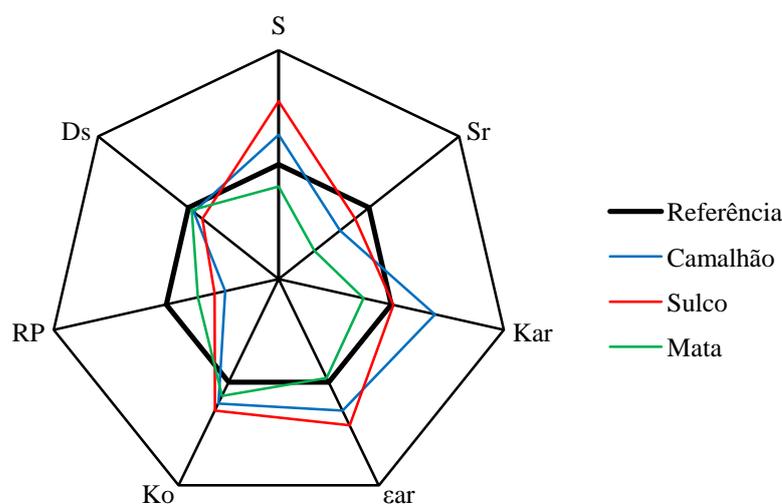


Figura 16 - Comportamento dos indicadores de qualidade física do solo: Índice S (S), Índice  $S_{\text{relativo}}$  ( $S_r$ ), Permeabilidade intrínseca do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), Porosidade de aeração ( $\epsilon_{ar}$ ), Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ), Resistência à penetração (RP), Densidade do solo ( $D_s$ ) em relação a valores críticos de referência para os sistemas de manejo do solo na camada de 0,0 a 0,3 m.

#### 4.10 Análise multivariada

A análise de componentes principais, técnica matemática de análise multivariada, permite identificar em um conjunto numeroso de dados as medidas responsáveis pelas

maiores variações entre os resultados sem perdas significativas de informações. Essa técnica transforma um conjunto original de variáveis em outro conjunto, os componentes principais, de dimensões equivalentes. Essa transformação se dá com a menor perda possível de informação, como também elimina algumas variáveis originais que possuam pouca informação. Já a análise de agrupamentos faz uso de várias técnicas e algoritmos, e tem como finalidade reunir objetos verificados nos grupos em que exista homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os grupos (VICINI, 2005).

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada na matriz de dados constituída de 15 variáveis. Conforme Vicini (2005), a escolha do número de fatores pode levar em conta diferentes critérios, sendo um destes a seleção de autovalores superiores a 1. Deste modo, foram selecionados apenas os componentes 1 e 2 por atenderem ao critério estabelecido. Estes dois componentes explicaram, juntos, 89,04% da variância, sendo 62,45% e 26,59% da variância explicada pelos fatores 1 e 2, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6 - Autovalores e percentual da variância explicada por cada componente.

Número de componentes	Autovalores			
	Extração dos componentes principais			
	Autovalores	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
1	9,37	62,45	9,37	62,45
2	3,99	26,59	13,36	89,04
3	0,98	6,53	14,33	95,57
4	0,31	2,04	14,64	97,61
5	0,20	1,30	14,84	98,91
6	0,11	0,74	14,95	99,65
7	0,05	0,30	14,99	99,95
8	0,01	0,05	15,00	100,00
9	0,00	0,00	15,00	100,00
10	0,00	0,00	15,00	100,00
11	0,00	0,00	15,00	100,00

De acordo com a Tabela 7, as variáveis que melhor explicaram ou mais contribuíram para o fator 1 foram areia, silte, grau de floculação, densidade do solo, porosidade total, macroporos, diâmetro médio ponderado, percentagem de agregados estáveis, matéria orgânica e índice S. Já para o fator 2, foram argila, resistência à penetração, índice  $S_{\text{relativo}}$ , permeabilidade intrínseca do solo ao ar e índice N de continuidade de poros.

Tabela 7 - Correlação dos atributos analisados com os componentes principais (CP) obtidos a partir de todos os atributos analisados.

Variável	CP1	CP2
Areia	-0,80	0,51
Argila	0,56	-0,67
Silte	0,98	-0,15
Grau de flocculação	-0,86	-0,38
Densidade do solo	-0,96	0,05
Porosidade total	0,98	0,01
Macroporos	0,97	0,02
Diâmetro médio ponderado	-0,96	0,09
Agregados estáveis	-0,96	0,10
Matéria orgânica	-0,89	0,32
Resistência à penetração	-0,32	-0,83
Índice S	0,91	0,38
Índice $S_{\text{relativo}}$	-0,52	-0,77
Permeabilidade intrínseca do solo ao ar	0,23	0,90
Índice de continuidade de poros, N	0,14	-0,87

Observa-se pela Figura 17 que quanto mais próximo da circunferência estiverem as variáveis, maior será sua importância na explicação da variância dos dados. Da mesma forma, o ângulo de inclinação da linha em relação a cada eixo do círculo indica o quanto esta variável é correlacionada com a componente principal, sendo bem ou mal correlacionada quando o ângulo é pequeno ou grande, respectivamente. Percebe-se que todas as variáveis estão próximas ao círculo unitário, indicando boa contribuição aos componentes principais. O mesmo ocorre com as variáveis macroporosidade e porosidade total. O sistema de cultivo em camalhão nas camadas subsuperficiais (0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m) e na camada de 0,0-0,3 m está situado próximo da origem, distante das variáveis em estudo, tendo assim pouca correlação com as mesmas. Variáveis como DMP, densidade do solo e agregados estáveis, por estarem bem próximas uma das outras, quase acontecendo sobreposição, possuem mesma representatividade no gráfico. As variáveis, por estarem localizadas em um mesmo quadrante, indicam a formação de estratos homogêneos, ou seja, no caso em análise, em geral, indistintamente do tratamento, as camadas superficiais do solo formaram grupos que se diferenciaram dos formados pelas camadas subsuperficiais. Nota-se que os atributos permeabilidade intrínseca do solo ao ar, índice S, porosidade total e macroporosidade tiveram maior influência nas camadas superficiais dos sistemas de cultivo em camalhão e sulco. O sistema sob mata nativa, nas camadas subsuperficiais (0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m) e na camada 0,0-0,3 m, foi correlacionado mais fortemente com as variáveis grau de flocculação, resistência à penetração e índice  $S_{\text{relativo}}$ , enquanto que a camada superficial da mata nativa teve maior

influência dos atributos areia, matéria orgânica, percentagem de agregados estáveis e diâmetro médio ponderado. É fácil perceber que as camadas superficiais dos sistemas sob cultivo estão mais bem relacionadas aos atributos ligados à porosidade do solo, enquanto a camada superficial do sistema sob mata o é por atributos ligados à agregação e textura.

É notória a diferença entre as camadas superficiais e subsuperficiais de todos os usos do solo no círculo. Isto é, as variáveis que têm maior influência nas camadas superficiais dos sistemas não têm boa correlação com as camadas subsuperficiais. Uma explicação razoável para o fato é haver uma diferença significativa na estrutura dessas camadas.

O sistema de cultivo em sulco nas camadas subsuperficiais, por ter influência, em sua maioria, de variáveis relacionadas com a textura (argila e silte), e visto que estes são atributos que não variam com o tempo, é menos susceptível ao manejo dado ao solo. Da mesma forma comporta-se o sistema de cultivo em camalhão por não ter boa correlação com as variáveis analisadas. O contrário ocorre com a camada superficial de todos os usos do solo, sendo bastante influenciada por atributos que podem ser alterados pelo manejo dado ao solo.

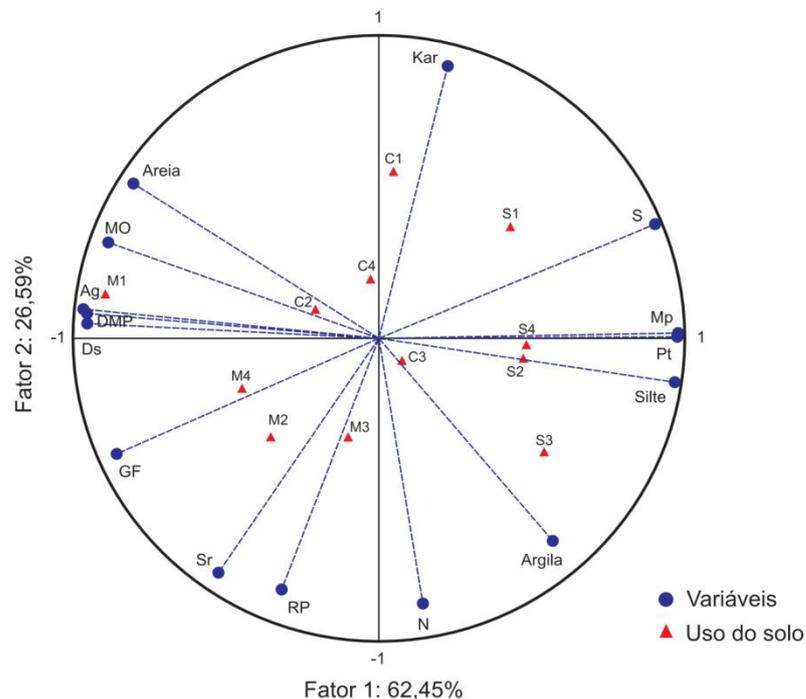


Figura 17 - Dispersão dos atributos físicos em diferentes condições de uso do solo. Ag = percentagem de agregados estáveis na classe (> 2,0 mm); DMP = diâmetro médio ponderado; Ds = densidade do solo; GF = grau de flocculação;  $K_{ar}$  = permeabilidade intrínseca do solo ao ar; MO = matéria orgânica; Mp = macroporosidade; N = índice de continuidade de poros, N; Pt = porosidade total; RP = resistência à penetração; S = índice S; Sr = Índice  $S_{relativo}$ . C1, C2, C3 e C4 correspondem ao sistema de cultivo de mamoeiro sob camalhão, S1, S2, S3 e S4 ao sistema de cultivo de mamoeiro sob sulco e M1, M2, M3 e M4 à mata nativa, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m.

Por meio do dendrograma, pode-se verificar a formação de quatro grupos (Figura 18). Um composto apenas pela camada superficial da mata nativa, outro formado pela camada superficial dos sistemas sob cultivo. As camadas subsuperficiais, como também a de 0,0-0,3 m do sistema sob sulco, compõem mais um grupo. Finalmente, as camadas subsuperficiais e a camada de 0,0-0,3 m dos sistemas sob mata nativa e camalhão formam outro grupo. Fica evidente a distinção das camadas superficiais e subsuperficiais de todos os sistemas como também a similaridade das camadas superficiais dos sistemas de cultivo em sulco e camalhão, corroborando os resultados mostrados no círculo unitário. Outro ponto que merece destaque é a similaridade entre as camadas subsuperficiais e a de 0,0-0,3 m dos sistemas sob mata nativa e camalhão. Da mesma forma ocorrem nas mesmas camadas do sistema em sulco, o que parece estar relacionado à semelhança das classes texturais destas camadas.

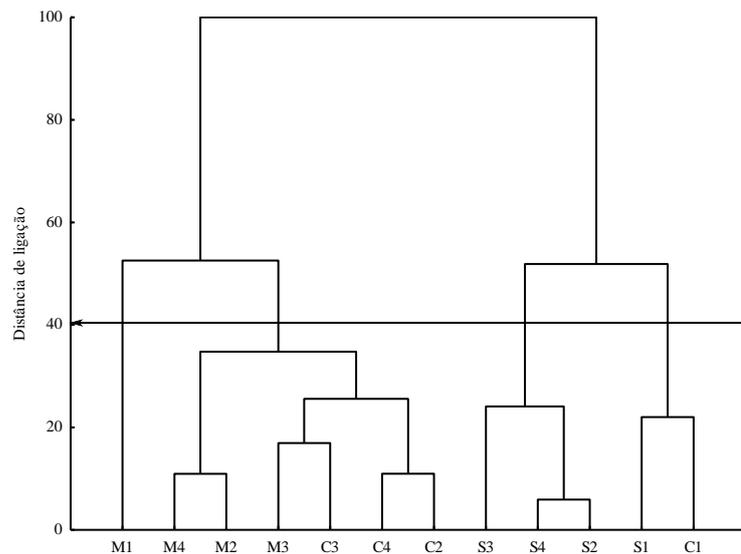


Figura 18 - Dissimilaridade entre os grupos estabelecida por distância euclidiana a partir dos atributos argila, areia, silte, grau de flocculação; percentagem de agregados estáveis na classe ( $> 2,0$  mm); diâmetro médio ponderado; matéria orgânica; densidade do solo; resistência à penetração; macroporosidade; porosidade total; permeabilidade intrínseca do solo ao ar; índice N de continuidade de poros; índice S; índice  $S_{\text{relativo}}$ . C1, C2, C3 e C4 correspondem ao sistema de cultivo de mamoeiro sob camalhão, S1, S2, S3 e S4 ao sistema de cultivo de mamoeiro sob sulco e M1, M2, M3 e M4 à mata nativa, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0-0,3 m.

## 5 CONCLUSÕES

A hipótese de que os sistemas de cultivo pioram os solos fisicamente foi refutada, indicando que a qualidade dos atributos do solo sob cultivo, em geral, está mantida ou melhorada em relação à condição de mata nativa.

O decréscimo do teor de matéria orgânica, da percentagem de agregados estáveis na classe de 4,76-2,00 mm de diâmetro e do diâmetro médio ponderado em solo cultivado, apesar de ainda estarem distantes de limites considerados críticos, são indicadores da necessidade de adoção de práticas de manejo que evitem o desencadeamento de um processo de degradação do solo.

Os indicadores de qualidade foram sensíveis às alterações provocadas pelos sistemas de manejo do solo e, portanto, podem ser utilizados como fonte para a interpretação da dinâmica de processos físicos do solo no tempo.

O indicador proposto para a avaliação da qualidade física do solo, o  $S_{\text{relativo}}$ , mostrou-se sensível para mensurar a resposta do solo às ações sobre sua estrutura.

## REFERÊNCIAS

- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 48: 699-702, 1984.
- ALCÂNTARA, E. N.; FERREIRA, M. M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 24: 711-721, 2000.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do solo, conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290 p.
- ANKENY, M. D.; AHMED, M.; KASPAR, T. C.; HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 55: 467-470, 1991.
- POLL, H. **Anuário brasileiro de fruticultura 2011**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2011. 128 p.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 33: 677-687, 2009.
- ARAÚJO, A. M.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 28: 337-345, 2004.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 29: 515-522, 2005.
- BALL, B. C.; LANG, R. W.; ROBERTSON, E. A. G.; FRANKLIN, M. F. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20 and 25 years of conventional tillage or direct drilling. **Soil Tillage Res.**, 31: 97-118, 1994.
- BALL, B. C.; O'SULLIVAN,.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, 39: 327-339, 1988.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G. A.; Camargo, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G. A.; Silva, L. S.; Canellas, L. P.; Camargo, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

- 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. **Journal of Soil Science**, 41: 215-228, 1990.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. pt. 1, p. 363-375. (Agronomy Monography, 9).
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. pt. 1, p. 377-382. (Agronomy Monography, 9).
- BRASIL. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento Exploratório: Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. Recife, 1973. v1. (DNPEA. Boletim Técnico, 28; SUDENE. Série Pedologia, 16).
- CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 10: 765-771, 2006.
- 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. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 33: 477-485, 2009a.
- CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil e Tillage Research**, 103: 158-164, 2009b.
- CHRISTENSEN, B. T.; JOHNSTON, A. E. Soil organic matter and soil quality: Lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. eds. **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam, Elsevier, 1997.
- DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461. (Agronomy Monography, 9).
- DANTAS, J. L. L.; CASTRO NETO, M. T. Aspectos botânicos e fisiológicos. In: Trindade, A.V. (org) **Mamão, Produção: aspectos técnicos**. Cruz das Almas: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000. p. 11-14, (Frutas do Brasil, 3).
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120: 201-214, 2004a.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. **Geoderma**, 120: 215-225, 2004b.
- DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Wiley Interscience**, 2007.

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Perímetro irrigado Jaguaribe Apodi**. Disponível em: <[http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros\\_irrigados/ce/jaguaribe\\_apodi.html](http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html)>. Acesso em: 18 jul. 2011.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAM, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. (Publication Special, 35)

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). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food and Agricultural commodities production, data 2010**. Disponível em : <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 29 maio 2012.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, 298 p.

FREIRE, M. B. G. S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. V. H.; FREIRE, F. J. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 7: 227-232, 2003.

FRENKEL, H.; GOERTZEN, J. O.; RHOADES, J. D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 42, n. 1, p. 32-39, 1978.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 383-411. (Agronomy Monography, 9).

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Rev. Bras. Ci. Solo**. 31: 863-873, 2007.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, 34: 101-114, 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro, v. 37, 2010. 91 p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência na qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesq. Agropec. Bras.**, 35: 1493-1500, 2000.

JONG VAN LIER, Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 25: 233-238, 2001.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 425-442. (Agronomy Monography, 9).

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: Relação solo-planta. Piracicaba, Ceres, 1979. 262 p.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 11: 93-99, 1946.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, 32: 945-953, 2002a.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 26: 857-867, 2002b.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).

LAL, R. Physical Management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century. **Soil Sci.**, 165: 191-203, 2000.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. Defining soil quality for the sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, 1994. (Publication Special, 35).

LEITE, Hugo Mota Ferreira. **Qualidade física do solo cultivado com goiabeira irrigada na Chapada do Apodi – CE**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e nutrição de plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335 p.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, 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. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32: 495-114, 2008.

McQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil Till. Res.**, 25: 217-230, 2002.

MOTA, Jaedson Cláudio Anunciato. **Caracterização física, química e mineralógica, como suporte para o manejo, dos principais solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi**. 2004. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e nutrição de plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; AMARO FILHO, J.; LIBARDI, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32: 49-58, 2008.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; AMARO FILHO, J. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 34: 1721-1731, 2010.

MUNKHOLM, L. J.; SCHJØNNING, P.; KAY, B. D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. **Soil Tillage Res.**, 64: 125-135, 2002.

PEDROTTI, A.; MELLO JÚNIOR, A. V. **Avanços em Ciência do Solo**: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental. São Cristóvão: Editora da Universidade Federal de Sergipe, 2009. 212 p.

PERROUX, K. M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 52: 1205-1215, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. São Paulo, Editora Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, 27: 29-48, 2003.

REINERT, D. J., REICHERT, J. M. e SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M. e CERETTA, C. A. eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS, 2001, 165 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16. 2006. **Anais**. Aracaju, SBCS, 2006. CD-ROM.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, 110: 131-146, 2002.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p. 128-152.

RODRIGUES, Sueli. **Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional**. 2009, 66f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 35: 105-114, 2011.

ROSEBERG, R. J.; MCCOY, E. L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 54: 969-974, 1990.

- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32: 11-21, 2008.
- SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L. J.; MOLDRUP, P.; JACOBSEN, O. H. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. **European Journal of Soil Science**. v. 53, p. 331-339, 2002.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58: 1775-1781, 1994.
- SILVA, A. P.; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 33: 1535-1545, 2009.
- SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, 298 p.
- SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, 2005.
- SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, 34: 399-406, 2004.
- 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. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 35: 429-436, 2011.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington, USDA, 1993. 437 p. (Handbook, 18).
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.
- STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32: 2603-2612, 2008.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 22: 573-581, 1998.
- TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, 59: 795-801, 2002.
- VAN BAVEL, C. H. M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 14: 20-23, 1949.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44: 892-897, 1980.

VEZZANI, M. L.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 33: 743-755, 2009.

VICINI, Lorena. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 p. Monografia (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa) - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 31: 1271-1280, 2007.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, 19: 1467-1476, 1988.

**ANEXOS**

ANEXO A - Equações ajustadas às curvas de retenção da água no solo para obtenção do conteúdo de água ( $\theta$ ) nas amostras de solo com estrutura preservada.

Sistema de manejo	Equação	$r^2$
Camalhão (0,0-0,1 m)	$\theta = 0,196 + \frac{0,457 - 0,196}{[1 + (0,8055 \phi_m )^{4,0532}]^{0,0901}}$	0,987
Camalhão (0,1-0,2 m)	$\theta = 0,206 + \frac{0,442 - 0,206}{[1 + (0,2527 \phi_m )^{1,0437}]^{0,4811}}$	0,992
Camalhão (0,2-0,3 m)	$\theta = 0,207 + \frac{0,442 - 0,207}{[1 + (0,3157 \phi_m )^{0,9696}]^{0,5126}}$	0,990
Sulco (0,0-0,1 m)	$\theta = 0,190 + \frac{0,485 - 0,190}{[1 + (0,0049 \phi_m )^{0,3998}]^{3,3032}}$	0,995
Sulco (0,1-0,2 m)	$\theta = 0,208 + \frac{0,491 - 0,208}{[1 + (0,0088 \phi_m )^{0,4412}]^{2,7818}}$	0,994
Sulco (0,2-0,3 m)	$\theta = 0,207 + \frac{0,492 - 0,207}{[1 + (0,0009 \phi_m )^{0,3850}]^{5,6223}}$	0,994
Mata (0,0-0,1 m)	$\theta = 0,198 + \frac{0,395 - 0,198}{[1 + (0,0048 \phi_m )^{0,4755}]^{2,5189}}$	0,989
Mata (0,1-0,2 m)	$\theta = 0,214 + \frac{0,435 - 0,214}{[1 + (0,0015 \phi_m )^{0,4076}]^{4,0743}}$	0,993
Mata (0,2-0,3 m)	$\theta = 0,207 + \frac{0,443 - 0,207}{[1 + (0,0173 \phi_m )^{0,4886}]^{2,0770}}$	0,995

$\theta$  (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\phi_m$  (kPa).

ANEXO B - Equações ajustadas às curvas de retenção da água no solo para obtenção do conteúdo de água ( $u$ ) nas amostras de solo com estrutura deformada.

<b>Mata - camadas</b>	<b>Equação</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
0,0-0,1 m	$u = 0,128 + \frac{0,461 - 0,128}{[1 + (0,2654 \phi_m )^{0,4640}]^{1,5724}}$	0,999
0,1-0,2 m	$u = 0,141 + \frac{0,499 - 0,141}{[1 + (1,0295 \phi_m )^{1,3067}]^{0,4844}}$	0,999
0,2-0,3 m	$u = 0,155 + \frac{0,511 - 0,155}{[1 + (0,3157 \phi_m )^{1,4058}]^{0,4814}}$	1,000

$u$  (kg kg<sup>-1</sup>);  $\phi_m$  (kPa).

ANEXO C - Análise estatística para matéria orgânica nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	650,28786	325,14393	11,5529**
Resíduo A	12	337,72669	28,14389	
Parcelas	14	988,01455		
Fator B (Profundidade)	2	702,87397	351,43699	23,9158**
Int. Ax B	4	411,26404	102,81601	6,9968**
Resíduo B	24	352,67365	14,69474	
Total	44	2454,82621		

MG = 18,74103

CV – A (%) = 28,31

CV – B (%) = 20,45

ANEXO D - Análise estatística para densidade de partículas nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	0,03901	0,01950	10,7826**
Resíduo A	12	0,02171	0,00181	
Parcelas	14	0,06071		
Fator B (Profundidade)	2	0,00341	0,00170	0,4325 <sup>ns</sup>
Int. Ax B	4	0,00327	0,00082	0,2077 <sup>ns</sup>
Resíduo B	24	0,09459	0,00394	
Total	44	0,16199		

MG = 2,60333

CV - A (%) = 1,63

CV - B (%) = 2,41

ANEXO E - Análise estatística para estabilidade de agregados nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	7383,41637	3691,70819	21,0193**
Resíduo A	12	2107,61089	175,63424	
Parcelas	14	9491,02726		
Fator B (Profundidade)	2	2151,23031	1075,61515	9,5129**
Int. Ax B	4	579,77777	144,94444	1,2819 <sup>ns</sup>
Resíduo B	24	2713,66116	113,06922	
Total	44	14935,69649		

MG = 63,04668

CV – A (%) = 21,02

CV – B (%) = 16,87

ANEXO F - Análise estatística para diâmetro médio ponderado nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	5,57397	2,78699	21,0193**
Resíduo A	12	1,64235	0,13686	
Parcelas	14	7,21633		
Fator B (Profundidade)	2	1,56298	0,78149	9,0430**
Int. Ax B	4	0,46490	0,11622	1,3449 <sup>ns</sup>
Resíduo B	24	2,07406	0,08642	
Total	44	11,31826		

MG = 2,37881

CV – A (%) = 15,55

CV – B (%) = 12,36

ANEXO G - Análise estatística para densidade do solo nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	0,29715	0,14857	49,9510**
Resíduo A	12	0,03569	0,00297	
Parcelas	14	0,33284		
Fator B (Profundidade)	2	0,00888	0,00444	1,1093 <sup>ns</sup>
Int. Ax B	4	0,04653	0,01163	2,9064*
Resíduo B	24	0,09605	0,00400	
Total	44	11,31826		

MG = 1,42210

CV - A (%) = 3,84

CV - B (%) = 4,45

ANEXO H - Análise estatística para resistência à penetração nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	1,77737	0,88869	5,8358*
Resíduo A	12	1,82737	0,15228	
Parcelas	14	3,60474		
Fator B (Profundidade)	2	2,30617	1,15309	16,0110**
Int. Ax B	4	2,35726	0,58931	8,1828**
Resíduo B	24	1,72844	0,07202	
Total	44	9,99662		

MG = 1,17713

CV – A (%) = 33,15

CV – B (%) = 22,80

## ANEXO I - Análise estatística para índice S nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	0,00516	0,00258	10,6945 <sup>**</sup>
Resíduo A	12	0,00290	0,00024	
Parcelas	14	0,00806		
Fator B (Profundidade)	2	0,00025	0,00013	1,7252 <sup>ns</sup>
Int. Ax B	4	0,00113	0,00028	3,8793 <sup>*</sup>
Resíduo B	24	0,00174	0,00007	
Total	44	0,01118		

MG = 0,04226

CV – A (%) = 36,76

CV – B (%) = 20,17

ANEXO J - Análise estatística para índice  $S_{\text{relativo}}$  nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	13,87224	6,93612	10,5193**
Resíduo A	12	7,91244	0,65937	
Parcelas	14	21,78468		
Fator B (Profundidade)	2	17,45279	8,72640	17,3672**
Int. Ax B	4	1,65632	0,41408	0,824 <sup>ns</sup>
Resíduo B	24	12,05916	0,50247	
Total	44	52,95295		

MG = 2,11792

CV – A (%) = 38,34

CV – B (%) = 33,47

ANEXO K - Análise estatística para Log condutividade hidráulica nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	0,46806	0,23403	16,0012**
Fator B (Tensão)	1	2,32978	2,32978	159,2916**
Int. AxB	2	0,12058	0,06029	4,1220*
Tratamentos	5	2,91842	0,58368	39,9076**
Resíduo	24	0,35102	0,01463	
Total	29	3,26945		

MG = 1,58299

CV (%) = 7,63983

ANEXO L - Análise estatística para Log permeabilidade intrínseca do solo ao ar nos sistemas de manejo e profundidades.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Fator A (Sistema)	2	15,27459	7,63729	4,2521*
Resíduo A	12	21,55350	1,79612	
Parcelas	14	36,82809		
Fator B (Profundidade)	2	11,24782	5,62391	11,6167**
Int. Ax B	4	2,99718	0,74929	1,5477 <sup>ns</sup>
Resíduo B	24	11,61894	0,48412	
Subparcelas	44	62,69202		
Fator C (Tensão)	4	12,98910	3,24727	186,3814**
Int. Ax C	8	0,47365	0,05921	3,3982**
Int. Bx C	8	0,76375	0,09547	5,4795**
Int. Ax Bx C	16	0,51956	0,03247	1,8638*
Resíduo C	144	2,50887	0,01742	
Total	224	79,94695		

MG = 1,05418

CV - A (%) = 127,13

CV - B (%) = 66,00

CV - C (%) = 12,52