

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**CIÊNCIA DO SOLO**

**DISSERTAÇÃO**

**Atributos Edáficos e Qualidade do Solo em Áreas de  
Agricultura, Pastagem e Fragmentos Florestais na  
Região do Médio Vale do Paraíba do Sul, Rio de  
Janeiro**

**Fernando Silva Coutinho**

**2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**ATRIBUTOS EDÁFICOS E QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE  
AGRICULTURA, PASTAGEM E FRAGMENTOS FLORESTAIS NA  
REGIÃO DO MÉDIO VALE DO PARAÍBA DO SUL, RIO DE JANEIRO**

**FERNANDO SILVA COUTINHO**

*Sob a Orientação do Professor*

**Marcos Gervasio Pereira**

*e Co-orientação do Professor*

**Richard Jonh Heck**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2012

631.4098153

C871a

T

Coutinho, Fernando Silva, 1985-

Atributos edáficos e qualidade do solo em áreas de agricultura, pastagem e fragmentos florestais na região do médio vale do Paraíba do Sul, Rio de Janeiro – 2012.

60 f. : il.

Orientador: Marcos Gervasio Pereira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo.

Bibliografia: f. 48-60.

1. Solos – Análise – Pinheiral (RJ) Teses. 2. Solos – Qualidade – Pinheiral (RJ) – Teses. 3. Solos – Manejo – Pinheiral (RJ) – Teses. 4. Tomografia – Teses. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.


É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

**FERNANDO SILVA COUTINHO**


Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências** em Agronomia.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/02/2012.




---

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ  
Orientador



---

José Luiz Rodrigues Torres. Dr. IF TRIANGULO MINEIRO



---

Geovane Barbosa do Nascimento. Dr. IF BAIANO

*Aos meus avós Conceição da Silva e Tomé Teodoro da Silva  
(in memoriam), Aratuza Vieria da Silva e Noberto Terra  
Coutinho (in memoriam), aos meus pais Elvira Fátima da  
Silva Coutinho e Amilton Terra Coutinho, aos meus irmãos  
Guilherme e Camilla, e a pessoa que está ao meu lado,  
amada, presente e sempre companheira Renata*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

Aos meus pais que muito se sacrificaram, para que eu chegasse até esse momento, me ensinando a lutar com dignidade e acima de tudo a respeitar as pessoas.

À encantadora Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelo acolhimento, pela lição de vida, pelos momentos bons e ruins, pelos amigos de turma que levarei para o resto da vida.

Ao professor e orientador Marcos Gervasio Pereira, pelo exemplo de profissionalismo, amizade e pelos bons momentos de convívio. Ainda pela orientação do trabalho, pelo apoio nos momentos difíceis, pela confiança e pelo incentivo que muito contribuíram para minha formação.

A professora Lucia Helena Cunha dos Anjos, pelo apoio, ensinamentos passados. Além de todo auxílio para que eu realizasse parte do mestrado na University of Guelph, no Canadá.

Ao professor do IFRJ campus Nilo Peçanha, Carlos Eduardo Menezes e ao Laboratório de Geoprocessamento aplicado a Florestas (GEOFLORA) pela amizade e grande colaboração neste trabalho.

Ao professor Richard J. Heck que me acolheu e ensinou durante toda minha estadia na Universidade de Guelph, Canadá.

Aos alunos de graduação Shirlei Almeida Assunção e Júlio César Feitosa Fernandes que sempre me ajudaram durante as tarefas de laboratório e as incansáveis idas a campo.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo da UFRRJ, pela formação e conhecimentos adquiridos.

Aos amigos Deivid Lopes Machado e Itaynara Batista pelo apoio e amizade durante todo mestrado.

À Renata Aparecia Costa e Silva, minha namorada, pelo convívio e motivação. Por sempre ter acreditado em mim e pelas diversas vezes que me ajudou nesta caminhada.

Aos amigos do Laboratório de Gênese e Classificação do Solo, pela colaboração e pelos agradáveis momentos.

A todos os funcionários do Departamento de Solos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e pelos bons momentos.

Ao CNPq pela bolsa de estudos

## RESUMO

COUTINHO, Fernando Silva, **Atributos edáficos e qualidade do solo em áreas de agricultura, pastagem e fragmentos florestais na região do médio vale do Paraíba do Sul-Rio de Janeiro**. 2012. 71f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Mudanças na cobertura vegetal do solo influem diretamente em seus atributos físicos e químicos, e assim na qualidade do solo, fundamental ao desenvolvimento de agricultura sustentável. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da cobertura vegetal e do uso do solo sobre os atributos edáficos em áreas de CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distrófico típico. Esse estudo foi conduzido na região do Médio Vale do Paraíba, município de Pinheiral-RJ. Foram escolhidas seis áreas: Floresta Secundária de Estádio Avançado (FSEA), Floresta Secundária Estádio Médio (FSEM), Floresta Secundária de Estádio Inicial (FSEI), área de Pasto Manejado Misto (PMM), Agricultura Perene (AP), e Agricultura Anual (AA). As amostras de terra foram coletadas em quatro profundidades (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) em dois períodos, em dezembro de 2009 (verão) e em agosto de 2010 (inverno). Foram avaliadas as propriedades físicas: densidade do solo (Ds), densidade das partículas (Dp), macro e microporosidade, granulometria, volume total de poros (VTP %); estabilidade dos agregados por meio do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), resistência do solo a penetração, e foram aplicadas técnicas de georadar (GPR) e tomografia computada (TC) de raios-X. As análises químicas consistiram de: pH em água, Mg, Ca, Al, K, Na, H+Al e P; carbono orgânico total (COT) e fracionamento químico da matéria orgânica do solo (MOS), quantificando-se o C das frações humina (C-HUM), ácidos húmicos (C-FAH) e ácidos fúlvicos (C-FAF). Em relação às propriedades físicas, a classe de textura do solo foi franco-argilo-arenosa, em todas as áreas e profundidades. Os valores de Ds variaram com a cobertura vegetal, onde as áreas de AA e AP apresentaram os maiores valores e as demais foram semelhantes entre si e menores na profundidade de 0-5 cm nas duas estações do ano. Os valores de DMP e DMG variaram com a Ds em todas as áreas na mesma profundidade. O uso do GPR, associado com as análises de resistência dos solos a penetração, permitiu observar aumento na resistência do solo a penetração nas áreas de floresta secundária estádio inicial, médio e avançado de 2,0 para 2,5Mpa, 2,0 para 3,0 Mpa e 2,5 para 6,0Mpa, respectivamente, devido à presença de raízes que aumenta em profundidade de acordo com o estádio sucessional. Já nas áreas de PMM, AP e AA o aumento na resistência a penetração ocorreu em função da presença de fragmentos do material de origem ao longo do perfil. Na área de AA, na profundidade de 20-40 cm, verificou-se redução na resistência a penetração devido a presença de galerias de formigas. A TC foi uma eficiente ferramenta, podendo ser comparada as análises de densidade e porosidade. Os resultados do GPR evidenciaram diferenças na resistência a penetração de cada área, em função da cobertura vegetal e do uso. O uso do GPR associado às medições de resistência à penetração do solo permitiu evidenciar alterações nas propriedades edáficas nas distintas áreas, sendo rápida, não destrutiva e contínua no transecto, evidenciando seu potencial para estudos pedológicos.

**Palavras - chave:** Atributos físicos e químicos. Georadar. Tomografia computada.

## ABSTRACT

COUTINHO, Fernando Silva **Edaphic attributes and soil quality in agricultural areas, pasture and forest fragments in the region of the Mid Paraíba do Sul Valley, Rio de Janeiro. 2012.** 71p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Changes in ground cover directly influence the soil physical and chemical attributes, and so the soil quality, fundamental to the development of sustainable agriculture. The objective of this study was to evaluate the influence of vegetation coverage and land usage on the edaphic attributes of areas of Inceptisols. The study was conducted in the Mid Paraíba do Sul Valley in Pinheiral municipality. There were chosen six areas: Secondary Forest of Advanced Stage (FSEA), Secondary Forest of Mid Stage (FSEM), Secondary Forest of Initial Stage (FSEI), Pasture with Mixed Management (PMM), Perennial Agriculture (AP), and Annual Agriculture (AA). The soil samples were taken at four depths (0-5, 5-10, 10-20 and 20-40cm) and two periods, in December 2009 (summer) and in August 2010 (winter). They were evaluated the physical properties: bulk density (BD), particle density (Dp), macro and microporosity, granulometry, total pore volume, aggregate stability through mean weight diameter (MWD) and mean geometric diameter (MGD), soil resistance to penetration; and usage of the georadar, computed tomography (CT) and X-ray techniques. The chemical analysis consisted of: pH, Mg, Ca, Al, K, Na, Al and H + Al and P, total organic carbon (TOC) and chemical fractionation of soil organic matter (SOM), quantifying the carbon in the humin fraction (C-HUM), humic acids (C-FAH) and fulvic acids (FAF-C). Regarding the physical properties, the sand-clay-loamy texture class was found in all areas and depths. The values of Ds varied according to vegetation coverage, where the AA and AP areas showed the highest values, and the other areas were very similar and smaller in the 0-5 cm depth at both periods. The values of DMP and DMG varied according to the DS in all areas, for the same depth. The usage of the georadar, associated to the soil resistance to penetration data, allowed to observe an increase in soil penetration resistance with depth, in the secondary forest of initial, intermediate and advanced stage, respectively, from 2.0 to 2.5 MPa, from 2.0 to 3.0 MPa, and from 2.5 to 6.0 MPa, due to the increase of roots with the successional stage. In the areas of PMM, AP and AA the increase in the soil penetration resistance was due to the presence of fragments of parent materials along the soil profile. The AA area, at a depth of 20-40 cm, also showed a reduction in soil penetration resistance due to presence of ant galleries. Computed tomography was an efficient tool, and it can be compared with the analysis of bulk density and porosity. The georadar data showed differences in the resistance to penetration of each area, depending on the soil coverage and use. The use of georadar associated with measurements of soil penetration resistance highlighted changes in soil properties in the different areas, and it is fast, non destructive and continuous in the transect, showing potential for pedological studies.

**Keywords:** Physical and chemical attributes. Georadar. Computed tomography.



## ÍNDICE DE TABELAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabela 1.</b> Precipitação total (mm) no município de Pinheiral-Rio de Janeiro.....   | <b>13</b> |
| <b>Tabela 2.</b> Análise granulométrica e classe textural nas diferentes áreas avaliadas. ....   | <b>19</b> |
| <b>Tabela 3.</b> Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) em áreas sob diferentes coberturas vegetais na estação chuvosa mês de dezembro e seca mês de agosto. ....  | <b>20</b> |
| <b>Tabela 4</b> Valores médios de macro e microporosidade (%) em áreas sob diferentes coberturas vegetais na estação chuvosa mês de dezembro e seca mês de agosto. ....  | <b>21</b> |
| <b>Tabela 5.</b> Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG) (mm) avaliado na estação chuvosa e seca. ....  | <b>25</b> |
| <b>Tabela 6</b> Valores médios de carbono orgânico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) na estação chuvosa e seca .....  | <b>25</b> |
| <b>Tabela 7</b> Coeficientes de correlação (Pearson) dos valores de DMP, DMG, COT, DS, MAC, MIC, C-HUM, C-FAH, RPS em solos de áreas de fragmento florestal estágio Avançado e Médio profundidade 0-5cm. ....                    | <b>32</b> |
| <b>Tabela 8</b> Coeficientes de correlação (Pearson) dos valores de DMP, DMG, COT, DS, MAC, MIC, C-HUM, C-FAH, RPS em solos de áreas de fragmento florestal estágio Inicial, Pasto Manejado Misto na profundidade 0-5cm. ....    | <b>33</b> |
| <b>Tabela 9</b> Coeficientes de correlação (Pearson) dos valores de DMP, DMG, COT, DS, MAC, MIC, C-HUM, C-FAH, RPS em solos de áreas de agricultura perene e anual na profundidade 0-5cm.....                                    | <b>34</b> |
| <b>Tabela 10.</b> Valores de pH, Ca, Mg, $\text{Al}^{+3}$ e H+Al nas diferentes profundidades.....   | <b>38</b> |
| <b>Tabela 11.</b> Valores de potássio (K), sódio ( $\text{Na}^+$ ) e fósforo (P) nas diferentes profundidades. ....  | <b>39</b> |
| <b>Tabela 12.</b> Valores médios das substâncias húmicas, C-FAH, C-FAF e C-HUM, e carbono orgânico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas áreas sob diferentes coberturas vegetais nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm ..... | <b>41</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 1.</b> Localização das áreas de estudo, Pinheiral (RJ). Capturada em 23/11/2011.....  | <b>10</b> |
| <b>Figura 2.</b> Caracterização das áreas de estudos em Pinheiral (RJ), (a) Floresta Secundária estágio avançado (FSEA), (b) Floresta secundária estágio médio (FSEM), (c) Floresta secundária estágio inicial (FSEI), (d) Pasto manejado misto (PMM), (e) Agricultura perene (AP) ( <i>Citrus</i> ) e (f) Agricultura anual (AA) ( <i>Manihot esculenta</i> ). ..... | <b>12</b> |
| <b>Figura 3.</b> Média de precipitação total dos anos de 2006 a 2008 e precipitação total do ano de 2009. ....  | <b>13</b> |
| <b>Figura 4.</b> Distribuição dos agregados estáveis em água por classe de tamanho no período chuvoso e seco na profundidade de 0-5 cm nas diferentes áreas no município de Pinheiral.....  | <b>23</b> |
| <b>Figura 5.</b> Distribuição dos agregados estáveis em água por classe de tamanho no período chuvoso e seco na profundidade de 5-10 cm nas diferentes áreas no município de Pinheiral.....   | <b>24</b> |
| <b>Figura 6</b> Resistência à penetração nas diferentes profundidades nas áreas de estudo. ....   | <b>27</b> |
| <b>Figura 7.</b> Transecto referente à área FSEA, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade 0,09 m ns <sup>-1</sup> .....  | <b>28</b> |
| <b>Figura 8.</b> Transecto referente à área de FSEM, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade 0,09 m ns <sup>-1</sup> .....   | <b>28</b> |
| <b>Figura 9.</b> Transecto referente à área FSEI, feito com antena de 900MHz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade 0,09 m ns <sup>-1</sup> .....  | <b>29</b> |
| <b>Figura 10.</b> Transecto referente à área de PMM, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade 0,11 m ns <sup>-1</sup> .....   | <b>29</b> |
| <b>Figura 11.</b> Transecto referente à área de AP, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade 0,11 m ns <sup>-1</sup> .....  | <b>30</b> |
| <b>Figura 12.</b> Transecto referente à área AA, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade 0,13 m ns <sup>-1</sup> .....   | <b>30</b> |
| <b>Figura 13.</b> Porosidade referente à área de FSEA, FSEM, FSEI, PMM, AP, AA obtidas por meio da análise de tomografia computada de raios-X.....  | <b>35</b> |
| <b>Figura 14</b> Densidade dos Agregados referente às áreas de FSEA, FSEM, FSEI, PMM, AP, AA obtidas por meio da análise de tomografia computada de raios-X. ....   | <b>36</b> |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                      | <b>2</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Indicadores de Qualidade do Solo.....</b>                           | <b>2</b>  |
| <b>2.2</b> | <b>Atributos Físicos do Solo como Indicadores de Degradação.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2.3</b> | <b>Compactação do Solo .....</b>                                       | <b>5</b>  |
| 2.3.1      | Resistência do solo a penetração .....                                 | 5         |
| 2.3.2      | Uso do georadar na agricultura.....                                    | 6         |
| <b>2.4</b> | <b>Tomografia Computada de Raios-X Aplicada a Solos.....</b>           | <b>6</b>  |
| <b>2.5</b> | <b>Atributos Químicos do Solo como Indicadores de Degradação .....</b> | <b>8</b>  |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Localização e Caracterização das Áreas de Estudo .....</b>          | <b>10</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Atributos Físicos do Solo.....</b>                                  | <b>13</b> |
| 3.2.1      | Composição granulométrica .....  | 13        |
| 3.2.2      | Densidade do solo (Ds) .....   | 14        |
| 3.2.3      | Macro e microporosidade .....  | 14        |
| 3.2.4      | Estabilidade dos agregados e carbono orgânico dos agregados .....      | 14        |
| 3.2.5      | Resistência do solo à penetração .....                                 | 15        |
| <b>3.3</b> | <b>Emprego do Georadar .....</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Tomografia Computada.....</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Atributos Químicos do Solo .....</b>                                | <b>18</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Análises Estatísticas.....</b>                                      | <b>18</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Análise Granulométrica .....</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Porosidade e Densidade do Solo.....</b>                             | <b>20</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Estabilidade dos Agregados.....</b>                                 | <b>22</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Georadar Associado ao Teste de Penetração .....</b>                 | <b>27</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Tomografia Computada (TC) .....</b>                                 | <b>35</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Atributos Químicos do Solo.....</b>                                 | <b>37</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Substancias Húmicas e Carbono Orgânico Total (COT) .....</b>        | <b>40</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>43</b> |
| <b>6</b>   | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                | <b>44</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

No Estado do Rio de Janeiro estima-se que a Mata Atlântica originalmente cobria cerca de 98% do território, com suas diferentes formações florestais: Ombrófila Densa, Estacional Semidecidual e Estacional Decidual e os ecossistemas associados, como manguezais, restingas e campos de altitudes (Fundação Instituto Estadual de Florestas, 2007). Essa cobertura restringe-se hoje a menos de 20%, encontrando-se bastante fragmentada e desconectada. Ela é representada por pequenas manchas florestais dispersas, em áreas de difícil acesso, isoladas, impactadas e circundadas por extensas matrizes formadas de pastos, capoeiras, monoculturas e áreas urbanas (Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2002).

A fragmentação das florestas, que ocasiona a ruptura dos fluxos gênicos entre populações presentes nesses habitats, se deu no estado do Rio de Janeiro, principalmente pela expansão da lavoura do café no período colonial e posterior uso das terras como pastagem para gado de leite. Viana (1990) destaca como principais conseqüências da fragmentação florestal a diminuição da diversidade biológica, as alterações no regime hidrológico das bacias hidrográficas, as mudanças climáticas, a degradação dos recursos naturais e mudanças na qualidade de vida das populações que vivem nessas bacias hidrográficas.

A recuperação da floresta uma vez degradada é lenta e em muitos casos ocorre de maneira espontânea. A intervenção no processo, com manejo e replantio de espécies arbóreas, a recuperação pode ser mais rápida. Ao se recuperar, a floresta perturbada atinge características próximas da floresta original, como repovoamento de espécies e estabilização do meio, e a velocidade de recuperação é dependente do grau de perturbação.

A sustentabilidade dos agroecossistemas depende, em grande parte, da manutenção das propriedades do solo dentro de níveis de variação que permitam sua restauração e que não venham a afetar a produção de colheitas ou o ambiente (Studdert et al., 1997). Práticas inadequadas de manejo alteram o equilíbrio entre o solo e o meio, alterando as propriedades edáficas e limitando o uso agrícola do solo. Quando se perde a cobertura arbustiva, a exposição do solo desnudo promove a formação de uma crosta superficial decorrente do impacto direto das gotas de chuva, que reduz a infiltração da água e aumenta o escoamento superficial (Galindo et al., 2008). Isto diminui as possibilidades de estabelecimento da cobertura vegetal tornando os solos descobertos susceptíveis à erosão hídrica e eólica.

As diferentes formas de uso do solo, seja a manutenção da floresta nativa secundária, agricultura perene ou anual, pastagem ou reflorestamento, afetam as propriedades edáficas. Os solos sob coberturas florestais diferem daqueles sob pastagem ou lavouras anuais, em decorrência das diferenças de esforços físicos sobre os mesmos, ou por essas coberturas alterarem a dinâmica da água, minerais e aportes orgânicos (Ryan & Mcgarity, 1983; Sampaio & Sampaio, 2002). Práticas incorretas de manejo de solos com pastagem têm conduzido a limitação do potencial produtivo desses sistemas, como conseqüência principalmente das inadequadas condições físicas e químicas do solo geradas (Rezende et al., 2011).

Ações antrópicas podem influenciar tanto na reconstrução do solo e de sua fertilidade quanto na sua degradação, pela adoção de práticas agrícolas adequadas ou não às condições edafo-ambientais (Palmieri & Larach, 1996). Ainda, a maioria dos estudos mostra deterioração na qualidade de água com o aumento do uso do solo (Chaves & Santos, 2009). Para definir práticas mitigadoras, as pesquisas buscam o conhecimento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, o que possibilita avaliar sua qualidade e potencial para o uso contínuo de maneira sustentável.

O presente estudo teve como objetivo avaliar as alterações ocorridas nos atributos físicos e químicos do solo em função da vegetação e uso do solo em diferentes áreas em Pinheiral, Rio de Janeiro.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Indicadores de Qualidade do Solo

A avaliação da qualidade dos solos é um fator importante, visto que está ligado diretamente à qualidade ambiental. Segundo o glossário de termos da Soil Science Society of America (1997) a qualidade do solo é definida como, a capacidade de um tipo específico de solo funcionar dentro dos ecossistemas naturais ou manejados para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais.

Uma das maneiras de mensurar a qualidade do solo e seus efeitos para o meio ambiente é por meio dos indicadores de qualidade do solo, que são atributos que podem ser monitorados em observações de campo, amostragem, sensoriamento remoto, por compilações de dados pré-existentes ou por combinação desses métodos. (Walker & Reuter, 1996; Arshad & Martin, 2002).

Embora existam muitos indicadores de qualidade que refletem a capacidade do solo em desempenhar sua função, poucos são aqueles capazes de prever a capacidade do solo em suportar uma gama de regimes de perturbação (Herrick, 2000). Portanto existe a necessidade de desenvolver indicadores de qualidade do solo de tal maneira que estes interajam com as propriedades e os processos físicos, químicos e biológicos do solo, que sejam aplicados as diversas condições de campo e complementem os dados já existentes. Além de serem fáceis de mensurar e que respondam ao uso, práticas de manejo, clima e fatores humanos (Doran & Parkin, 1994; Shukla, et al., 2006).

Os indicadores devem descrever os importantes processos ecológicos no solo de modo que uma série de análises bioquímicas e microbiológicas possa ser usada na avaliação deste, quando se considera o impacto do manejo na qualidade do solo (Bending et al., 2004).

Os atributos físicos do solo têm sido considerados bons indicadores de sua qualidade permitindo, portanto, o seu uso para o monitoramento das alterações causadas por algum tipo de intervenção a que tenha sido submetido (Arshad et al., 1996). Muitas são as propriedades físicas que podem ser usadas para avaliar a intensidade dessas alterações. A textura apresenta considerável efeito sobre as propriedades dos solos tais como retenção de água, retenção de cátions, erodibilidade, permeabilidade, retenção de fosfatos, lixiviação de nitratos, formação de solo superficial, coesão e adesão, entre outras (Oliveira, 2001).

Os atributos físicos do solo podem ser divididos em mecânicos (textura, densidade do solo, agregação e porosidade), hidrológicos (capacidade de água disponível e taxa de infiltração) e zona de enraizamento (profundidade efetiva de enraizamento e temperatura do solo) (Arshad & Martin, 2002). Os atributos químicos incluem o pH, saturação por bases, capacidade de troca catiônica (CTC), nutrientes totais e disponíveis e matéria orgânica do solo (MOS) (Lal, 1999).

Nos solos de baixa fertilidade, os estoques de carbono (C) e nutrientes encontrados na serapilheira e na parte aérea são importantes na definição do balanço de C e nutrientes e poderiam servir como indicadores da capacidade produtiva dos diversos fragmentos florestais da Mata Atlântica (Gama-Rodrigues & Barros, 2002; Gama-Rodrigues et al., 2008). Assim, estudos desse tipo poderiam ainda fornecer subsídios para o desenvolvimento de técnicas de melhoria dos atuais fragmentos florestais, bem como na recomposição de parte do maciço florestal nas áreas de pastagens degradadas adjacentes (Gama-Rodrigues & May, 2001).

Silva et al. (2006) afirmam que o uso das terras promove grandes variações em sua composição química, visto que os diferentes tipos de vegetação o protegem de maneira diferenciada e que a intensidade do manejo adotado, quase tão importante quanto o tipo de vegetação, influenciam decisivamente na intensidade dessas alterações. As diferentes

coberturas vegetais do solo também podem refletir em suas propriedades químicas, na superfície e em sub-superfície, dentre elas na diminuição ou o aumento da matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes, com conseqüências na qualidade do solo e do ambiente como um todo.

A entrada de carbono orgânico no solo resulta no aumento da biomassa microbiana e das frações mais lábeis da matéria orgânica (Herrick & Wander, 1998). Essas mudanças eventualmente são seguidas do aumento da matéria orgânica do solo, capacidade de infiltração da água e disponibilidade de nutrientes (Monreal et al., 1998).

A matéria orgânica desempenha papel fundamental na sustentabilidade dos sistemas naturais e dos agroecossistemas. Ela atua como fonte de energia e nutrientes para os organismos do solo, no fornecimento de nutrientes para as plantas, na melhoria da capacidade de troca de cátions e no tamponamento do pH, na complexação de elementos tóxicos (Bayer & Mielnizuk 1999), além de seu efeito, como já visto, na melhoria de propriedades físicas.

A sustentabilidade dos sistemas agrícolas depende, em grande parte, da manutenção das propriedades do solo dentro de níveis de variação que permitam sua restauração e que não venha afetar sua capacidade produtiva e suas condições ambientais (Studdert et al., 1997). Segundo Islan & Weil (2000) a qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo em desempenhar a sua função em um ecossistema para suportar plantas e animais, resistir à erosão e reduzir impactos negativos associados aos recursos água e ar. As diferentes formas de uso do solo sejam com a manutenção da floresta nativa secundária, culturas anuais e perenes, pastagens ou reflorestamento, podem mudar as características e atributos edáficos. O grande desafio dos estudos sobre sustentabilidade é com relação ao desenvolvimento de métodos para avaliação da qualidade do solo e do ambiente sob a interferência do homem (Melloni et al., 2008).

Assim, a qualidade do solo consiste em um estado funcional complexo e, portanto, não pode ser medida diretamente, porém pode ser inferida por meio de propriedades do solo designadas como propriedades indicadoras da qualidade do solo. Atributos edáficos podem ser utilizados como indicadores do impacto do uso e manejo do solo fornecendo informações úteis ao controle da degradação ambiental (Cordeiro et al., 2008). Estudos da avaliação de atributos químicos, físicos e biológicos na qualidade do solo são essenciais no entendimento da funcionalidade e sustentabilidade de solos em diferentes condições de uso.

## **2.2 Atributos Físicos do Solo como Indicadores de Degradação**

As mudanças na vegetação, bem como o cultivo do solo, causam alterações nas suas propriedades físicas, pois mesmo a prática cultural mais simples como capina manual, pode proporcionar a pulverização de sua superfície (Russel & Russel, 1961). As diferentes coberturas vegetais do solo podem promover modificações em suas propriedades físicas, alterando a infiltração da água, o escoamento superficial, a suscetibilidade à erosão hídrica, a aeração e a resistência ao desenvolvimento radicular. Os atributos físicos do solo têm sido considerados bons indicadores de sua qualidade permitindo, portanto, o seu uso para o monitoramento das alterações causadas por algum tipo de intervenção que os solos tenham sido submetidos (Arshad et al., 1996).

A densidade das partículas do solo definida como à relação entre a massa das partículas secas do solo e seu volume total (Hillel, 1970; Corsini & Ferraudo, 1999), é influenciada pelo teor de matéria orgânica, estrutura, mineralogia e as práticas de manejo. A importância da densidade do solo está diretamente relacionada com a disponibilidade total de espaço poroso para o armazenamento de ar, água e crescimento radicular (Weil et al., 1993 ; Menezes, 2008) e considerada uma propriedade física indicadora do estado de degradação do solo, pois é influenciada pela substituição da vegetação nativa por culturas, ou seja, tem seu valor aumentado em solos cultivados (Silva, 1981; Coote e Ramsey, 1983).

A capacidade do solo em desempenhar suas funções no desenvolvimento vegetal está fortemente ligada sua qualidade estrutural (Dexter, 2002). Estrutura do solo refere-se ao padrão de arranjo das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) em unidades estruturais compostas chamadas de agregados, separadas entre si por linhas de fraqueza, ou apenas superpostas e sem conformação definida (Santos et al., 2005).

A estrutura é uma das propriedades do solo que mais afeta a produção agrícola, determinando a profundidade de penetração das raízes, quantidade de água a ser estocada, movimento de ar, água e desenvolvimento da fauna do solo (Hermavan e Cameron, 1993; Langmaack, 1999; Pagliai et al., 2004). A estrutura é uma propriedade sensível ao manejo e pode ser analisada segundo variáveis relacionadas à sua forma e ou a sua estabilidade. De modo geral, com o aumento da intensidade de cultivo tem sido observada alteração no tamanho dos agregados do solo, aumento da densidade do solo, redução da porosidade total e aumento da resistência do solo à penetração (Silva & Mielniczuk, 1997; Alvarenga & Davide, 1999).

A agregação do solo é um processo que ocorre em duas etapas, sendo a primeira relacionada com a aproximação das partículas e a segunda com a sua estabilização por agentes cimentantes (Baver et al., 1972). O produto final desse processo resulta na formação de unidades estruturais, que em conjunto, definem a estrutura do solo. Esta é a propriedade física mais relacionada à degradação e recuperação dos mesmos, e apresenta grande dinamicidade no tempo em função do manejo (Reinert, 1998).

A formação e ou alteração de agregados estáveis, proporcionada pelos diferentes sistemas de manejo do solo, constitui um importante parâmetro para avaliação da estrutura do solo. Segundo Kiehl (1979), o sistema de manejo é um fator que pode ser correlacionado com a estrutura do solo; desta forma o uso em condições inadequadas, pode promover efeitos negativos sobre sua conservação. O mecanismo de formação das diferentes classes de tamanho do agregado é influenciado pela matéria orgânica, cuja qualidade irá permitir maior ou menor agregação, sendo responsável por 56% da estabilidade dos agregados (Castro Filho et al., 1998 Arshad & Martin, 2002 ).

A estabilização dos agregados depende do contínuo fornecimento de matéria orgânica de maneira suficiente para compensar a rápida perda de carbono orgânico do solo. Em regiões tropicais, os solos são submetidos a altas temperaturas que favorecem maiores taxas de decomposição, diminuindo, dessa forma, o conteúdo de carbono orgânico e, conseqüentemente, a estabilidade dos agregados (Bronick & Lal, 2005).

O estudo desenvolvido por Islan & Weil (2000) demonstrou que a estabilidade dos agregados e outros atributos físicos como a densidade do solo e porosidade são fortemente influenciados pelo manejo do solo, servindo como indicadores gerais da qualidade do solo.

Na avaliação da qualidade estrutural do solo, além das tradicionais análises de estabilidade dos agregados e condutividade hidráulica a quantificação da porosidade tem sido cada vez mais usada, pois a forma, tamanho e continuidade afetam importantes processos no solo. (Ringrose-Voase & Bullock, 1984; Pagliai et al , 2004).

Porosidade do solo refere-se à parte de um volume de solo que não é ocupado por partículas de solo ou matéria orgânica, mas, preenchidos com ar, gases ou água. Os poros maiores (macroporos) permitem a circulação de ar e promove à drenagem de água, eles também são grandes o suficiente para acomodar as raízes das plantas e uma gama de pequenos animais que habitam o solo. Os poros menores (microporos) exibem forças atrativas o suficiente para reter a água contra a força da gravidade e disponibilizar para as plantas (Brady & Weil, 1999; Munshower, 1994).

A porosidade e a densidade do solo (relação massa/volume de solo) têm sido utilizadas como indicadores da qualidade do solo, por tratar-se de propriedades dinâmicas, suscetíveis

ao uso e de fácil determinação, estando relacionadas, principalmente, à compactação e a relativa restrição ao crescimento radicular (Arshad et al., 1996).

Solos sob cobertura original de floresta, ou mesmo de pastagem nativa não submetida a intervenções intensas, tendem a manter sua organização original, sem alterações significativas na agregação, com conseqüente manutenção dos volumes de macroporos e microporos e de densidade do solo (Tisdall & Oades, 1982). Porém, solos quando submetidos à retirada da cobertura vegetal natural e principalmente quando cultivados intensamente, tendem a ter sua estrutura original modificada pelo fracionamento dos agregados maiores em unidades menores, com conseqüente redução da macroporosidade e aumento da microporosidade e da densidade (Carpenedo & Mielniczuk, 1990).

A diminuição da macroporosidade e porosidade total implicam no aumento da resistência à penetração de raízes na zona radicular e diminuição da infiltração de água no solo (Bertol, 1989) gerando o fenômeno conhecido como compactação do solo. A compactação ocorre quando o solo é submetido à determinada pressão, ocasionando redução de volume com conseqüente aumento da resistência à penetração e da densidade (Stone et al., 2002). A compactação do solo é definida pela Soil Science Society of America (1996) como o processo pelo qual as partículas dos solos se reorganizam de maneira a diminuir o espaço poroso entre elas e em conseqüência aumentam a densidade.

Segundo Figueiredo et al. (2000), a compactação é uma conseqüência direta do manejo inadequado, e a umidade é o fator que controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo. De maneira geral, a compactação altera as propriedades físicas do solo, comumente com o aumento da resistência mecânica à penetração e densidade do solo (Bertol et al., 2000), limita o crescimento vegetativo e compromete o rendimento das culturas (Dias Junior, 2000).

A extensão de problemas da compactação do solo pode ser aumentada, devido à diminuição da matéria orgânica, que é uma conseqüência constatada em todo mundo (Hamza & Anderson, 2005). A compactação também afeta a mineralização do carbono orgânico e nitrogênio (Neve & Hofman, 2000) assim como a concentração de dióxido de carbono no solo (Conlin & Driessche, 2000).

## **2.3 Compactação do Solo**

Na agricultura moderna o problema da compactação do solo acontece em cerca de 68 milhões de hectares em todo o mundo, este problema é advindo principalmente do intensivo tráfego de máquinas pesadas utilizadas no sistema de plantio e preparo do solo (Beutler, et al, 2004). A compactação aumenta a densidade do solo, reduz o volume total de poros (Freddi et al., 2007) afetando a dinâmica da água, do ar e do calor, e pode afetar a eficiência da utilização de fertilizantes e herbicidas pelas plantas em função do menor desenvolvimento radicular (Hakansson & Voorhees, 1998). Em todos os níveis de compactação do solo, a resistência a penetração aumenta com a diminuição do potencial da água (Lipiec et al., 2003).

### **2.3.1 Resistência do solo a penetração**

Os mecanismos de compressibilidade que um solo apresenta dependem de uma série de fatores externos e internos, sendo os fatores externos caracterizados pelo tipo, intensidade e freqüência da carga aplicada, enquanto os fatores internos são influenciados pela umidade do solo, textura, mineralogia, estrutura e densidade inicial do solo (Dias Jr. e Pierce, 1996).

Uma das maneiras de se identificar camadas adensadas ou compactadas do solo é o uso do penetrômetro, aparelho que mede a resistência do solo a penetração (Martins et al., 2006). Segundo Stolf (1991), penetrômetros são instrumentos utilizados para determinar a resistência do solo no qual penetram e podem ser divididos em dois grupos: a) Penetrômetros de impacto, inicialmente utilizados pela engenharia civil, mas que na década de 80 foram



adaptados no Brasil para fins agrícolas (Stolf et al., 1983), sendo 20 vezes menores que os de uso para a engenharia civil. A medida é feita com o impacto de um peso que cai de uma altura constante, em queda livre, sobre uma haste, fazendo dessa forma, que ela penetre no solo. Conta-se o número de impactos necessários para que o aparelho penetre a uma determinada espessura (penetrômetros dinâmicos). b) Penetrômetros convencionais de uso agrícola: para efetuar a medida, o conjunto é pressionado contra o solo a uma velocidade constante e a resistência oferecida ao avanço de sua ponta pode ser lida ou registrada com um dinamômetro (penetrômetros estáticos).

Entre os dois tipos de penetrômetros apresentados, os de impacto são mais utilizados em estudos de resistência a penetração do solo, devido seu baixo custo e a possibilidade de se trabalhar em solos de alta resistência, baixa umidade e altos teores de argila (Pedro Vaz et al. 2002). Porém, durante o teste algumas observações de campo devem ser feitas, pois a resistência do solo à penetração é um índice integrado pela densidade do solo, textura, matéria orgânica e umidade do solo (Camargo & Alleoni, 1997).

A compactação do solo é um processo de aumento da densidade, no qual também ocorre aumento da resistência à penetração no solo, redução da porosidade total e macroporosidade, redução da permeabilidade e da infiltração de água resultantes de cargas aplicadas na superfície do solo (Soane & Ouwerkerk, 1994).

### **2.3.2 Uso do georadar na agricultura**

O georadar ou GPR (*Ground Penetrating Radar* - Radar de Penetração no Solo) pode complementar ou substituir informações de alguns métodos de estudo de solo, principalmente na avaliação de atributos morfológicos e físicos e a presença de camadas compactadas ou adensadas, de maneira mais rápida, precisa e não destrutiva. Em estudos pedológicos, o uso do GPR reduz o número de perfis que devem ser abertos e avaliados em uma dada paisagem ou topossequência na abordagem tradicional geomorfo-pedológico, fornecendo ainda informações importantes na análise de aspectos do subsolo (Aranha et al., 2002).

A técnica do GPR permite detectar objetos e camadas de materiais distintos, por meio do contraste entre as propriedades dielétricas desses materiais, onde a avaliação pode ser feita ao longo da área de estudo e não de maneira pontual como nas técnicas tradicionais. O GPR tem sido usado na última década para investigação e diagnóstico, de maneira não destrutiva, de elementos estruturais em vários setores da construção civil, pela rapidez na aquisição dos dados e custos mais baixos comparados com outras técnicas de ensaio destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas (Cesar et al., 2009). Porém, poucos são os estudos aplicando GPR a solos e, em geral, envolvem atributos do solo como a mudança textural e profundidade do lençol freático (Lani et al., 2005; Francelino et al., 2007) ou localização de horizontes pedogenéticos adensados (Ucha et al., 2002). O GPR apresenta potencial para identificar seções do solo compactadas e, dessa forma, relacionar com a degradação do solo em áreas sob diversas coberturas e manejos.

## **2.4 Tomografia Computada de Raios-X Aplicada a Solos**

Alterações na estrutura do solo devido aos processos de degradação influenciam em muitos aspectos, tais como resistência a penetração, acúmulo de gás, movimento de água e temperatura, que por sua vez afetam raízes e parte aérea e, conseqüentemente, a produção agrícola e qualidade ambiental. A quantificação adequada dos efeitos da compactação do solo é essencial para desenvolver estratégias de manejo que minimizem os efeitos nocivos de compactação (Lipiec & Hatano, 2003).

Existem varias análises tradicionais que avaliam as condições físicas do solo e assim mensuram o nível de degradação, como avaliação da agregação, teste de resistência a

penetração, avaliação da densidade, macro e microporos entre outros, porém esses métodos avaliam de maneira destrutiva, e em muitos casos laboriosa.

A tomografia computada de raios-X (TC) é uma técnica que apresenta como maior vantagem, a análise não invasiva e não destrutiva de uma amostra, sendo adequada para análises de materiais relativamente densos, portanto, tem se mostrado uma excelente ferramenta para estudo em solos (Warner et al. 1989; Tollner, 1991). A adaptação da TC para gerar modelos de solo em terceira dimensão permite a quantificação de características, como, porosidade, agregação e arranjo espacial dos constituintes que refletem o desenvolvimento do solo (Elliot & Heck, 2007). Escanear com diferentes níveis de energia permitindo a distinção entre minerais com densidades relativamente similares, porém em alguns casos como no caso do quartzo e da calcita a diferenciação é mais difícil, pois estes minerais apresentam uma única atenuação (Heck & Elliot, 2006)

A TC ganhou considerável popularidade nos últimos 10 anos, principalmente após a adaptação da técnica para gerar modelos com aquisição de imagens tridimensionais (3D) de solo, permitindo a quantificação micromorfológica (Taina et al., 2008).

O TC foi criado por Godfrey Hounsfield nos anos setenta, que recebeu um prêmio Nobel por sua invenção (Hounsfield, 1973; Pires et al., 2010). Os primeiros estudos utilizando esta técnica foram em medicina humana, embora inicialmente a TC tenha sido usada para estudos apenas em nível macro, vem sendo cada vez mais usada em nível micro, e também em análises quantitativas e qualitativas aplicadas em amostras de terra (Fourie et al 2007; Abdul-Aziz et al, 2006; Watson et al, 2006; Tabor et al., 2007). Os dados recuperados das análises de TC permitem que o pesquisador analise o que antes eram considerados fenômenos invisíveis e que permaneceram assim durante centenas de anos (Fourie et al., 2007).

Os principais benefícios da técnica de TC são: redução de danos causados a amostra durante a coleta, fornecer informações em 3D e permitir a digitalização rápida para estudar a dinâmica da amostra (Elliot & Heck, 2007a, Piñuela et al., 2010). Esta ferramenta também pode ser considerada útil na extração de informações qualitativas e quantitativas de minerais do solo e componentes orgânicos, respeitando as limitações que são impostas pelos níveis de energia utilizados para aquisição de imagens e também pela resolução de imagens (Taina et al., 2007).

Existem muitos trabalhos utilizando TC para avaliar características físicas do solo, como regeneração biológica do solo após compactação (Langmaack et al., 1999), efeitos da compactação do solo nas propriedades físicas e crescimento das culturas (Lipiece & Hatano, 2003), avaliação dos macroporos e sua conectividade, porosidade, tamanho e distribuição dos poros (Grevers et al, 1989; Pierret et al, 2002; Rachman et al., 2005).

Várias propriedades relativas a poros são estudadas com o uso de TC (Anderson et al., 1990; Peyton et al., 1994; Rachman et al., 2005, Taina et al., 2010). O estudo de poros do solo se faz importante uma vez que as alterações na porosidade devido ao manejo do solo implicam diretamente em alterações de outras propriedades físicas como densidade e resistência a penetração do solo de raízes (Bertol, 1989). O termo porosidade se refere a um contínuo, enquanto, espaços vazios por definição se referem a espaços isolados assim como fissuras e rachaduras que acabam sendo identificadas com porosidade nos métodos tradicionais de avaliação da porosidade do solo (Stoops, 2003).

Entre as dificuldades do uso da técnica de TC está à etapa de segmentação de imagens, para identificar as unidades estruturais de interesse, este é um típico problema em geociências e em muitas outras áreas. Um exemplo é a análise da estrutura dos poros em solos, baseada em imagens de escala de cinza obtidas com a tomografia de raios-x. (Wildenschild et al., 2002; Vogel et al., 2010). O problema geral é encontrar a regra adequada para atribuir cada pixel para cada poro e sólido. O histograma cinza utilizado para identificação de poros e

sólido é bimodal, tanto que o valor limiar pode ser facilmente encontrado. Entretanto, dependendo da resolução da imagem, existem sempre características estruturais na dimensão, compreendida por pixels estruturais, que são conhecidas como “efeito de volume parcial” onde existe uma suave transição entre poros e sólidos (Schluter et al., 2010). Portanto, o mais importante torna-se uma determinação objetiva e reprodutiva da segmentação limiar porque os resultados da subsequente análise podem ser altamente sensíveis a esse procedimento.

Estudos mostram que raramente existe apenas um método de segmentação que supere todos os outros diferentes testes de imagens e cenários limiares testados (Sahoo et al., 1988; Sezgin & Sankur, 2004). Em um recente trabalho relativo à TC na avaliação de materiais porosos, Iassonov et al. (2009) compararam várias técnicas de segmentação, tais como limiarização global, limiarização local adaptativa, região de cultivo, superfícies deformáveis, agrupamento probabilístico difuso e métodos Bayesianos, entre outros. Os autores concluíram que o uso de informações espaciais local é crucial para obter uma boa qualidade de segmentação.

Neste estudo optou-se pelo método proposto por Pavlidis & Liow (1990) e adaptado por Elliot & Heck (2007b) e Schluter, et al. (2010), que é a detecção de bordas usadas como etapa de pré-processamento para isolar as regiões que contêm as informações mais importantes e determinar com ele limiares adequados.

## **2.5 Atributos Químicos do Solo como Indicadores de Degradação**

As propriedades químicas dos solos são atributos facilmente alterados em função do manejo e da cobertura vegetal. O elevado grau de intemperismo em solos de regiões tropicais resulta em baixa capacidade de troca catiônica e baixa saturação por bases, elevados teores de alumínio em consequência baixos teores de cálcio e magnésio. Enfatizando a existência de uma estreita relação entre o tipo de vegetação e o manejo do solo com suas propriedades, o uso do solo causa grandes variações em sua composição química, visto que os diferentes tipos de vegetação o protegem de maneira diferenciada e que a intensidade do manejo adotado, quase tão importante quanto o tipo de vegetação, influenciam decisivamente na intensidade dessas alterações (Silva et al., 2007).

Muitas são as propriedades químicas que têm sido empregadas para avaliar a intensidade dos impactos do uso e manejo das terras na qualidade química do solo e do ambiente como um todo. Entre elas podem ser citadas: o conteúdo de matéria orgânica do solo e seus compartimentos, estoque de carbono, valores de pH, alumínio, cálcio, magnésio, potássio, fósforo, soma de bases (valor S), capacidade de troca de cátions (valor T) e percentagem de saturação por bases (valor V) (Menezes, 2008).

A MOS é originada pelas plantas e microorganismos que nele habitam, sendo que a vegetação é a principal fonte, seja pela deposição de material (serapilheira) ou contribuição das raízes. Solos que suportam coberturas florestais normalmente possuem maior conteúdo de matéria orgânica que aqueles utilizados para fins agrícolas, devido à maior deposição de material e à menor taxa de mineralização da matéria orgânica (Miranda, 2005).

Segundo Roscoe et al., (2002), a matéria orgânica representa o componente fundamental para a manutenção da qualidade do solo, estando envolvida em diversos processos físicos, químicos e biológicos. Desequilíbrios no seu suprimento e alterações nas taxas de decomposição podem provocar a sua redução em solos sob cultivo, desencadeando processos de degradação, onde a sustentabilidade de agroecossistemas está intimamente relacionada à sua manutenção.

A importância da matéria orgânica nos solos é abrangente, tanto na melhoria das condições físicas, quanto nas propriedades químicas e físico-químicas, no fornecimento de nutrientes às plantas e na maior capacidade de troca catiônica do solo (CTC), além de

proporcionar um ambiente adequado ao estabelecimento e à atividade da microbiota (Figueiredo et al., 2008).

Uma forma de classificar os compartimentos da matéria orgânica do solo, tendo como critério a estabilidade ou resistência à decomposição de seus constituintes, foi apresentada por Coleman et al. (1989). Nessa classificação o compartimento de menor resistência ou maior labilidade recebe a denominação de fração leve ou macroorgânica e representa a matéria orgânica particulada, derivada dos resíduos de plantas e hifas que ainda apresentam estruturas celulares reconhecíveis, cuja permanência no solo está condicionada à recalitrância de seus compostos constituintes e à proteção física exercida pelos agregados; o compartimento de maior resistência recebe a denominação de fração pesada e representa a matéria orgânica em avançado estágio de decomposição (substâncias húmicas e outras macromoléculas), associada aos minerais do solo (Freixo et al., 2002; Pinheiro, 2002).

As substâncias húmicas (SHs) representam mais de 70% do carbono presente no solo e são diferenciadas pela cor, massa molecular, presença de grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, entre outros) e grau de polimerização (Schnitzer, 1978). As SHs são amplamente distribuídas sobre a Terra, encontrando-se no solo ou nas águas. Originam-se da degradação química e biológica de resíduos orgânicos e da atividade sintética da biota do solo.

Stevenson (1994) classificou a matéria orgânica do solo distinguindo-a em diferentes pools: biomassa microbiana; carbono orgânico particulado, tipicamente compreendido de resíduos de plantas, animais e microrganismos, carbono orgânico associado a minerais, e substâncias húmicas as quais compreendem ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas.

As SHs são compostos de cor escura, peso molecular relativamente elevado, formadas por reações de sínteses secundárias bióticas e abióticas são divididas em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e as huminas. Os ácidos fúlvicos são compostos de maior solubilidade e por apresentarem maior polaridade e menor tamanho molecular, são os principais responsáveis por mecanismos de transportes de cátions no solo. Os ácidos húmicos são a fração mais estudada e apresenta pouca solubilidade e maior acidez, normalmente encontrada em solos tropicais é responsável pela maior parte da CTC (capacidade de retenção de cátions) de origem orgânica em camadas superficiais. A humina, apesar de apresentar baixa reatividade, é responsável pela agregação das partículas e na maioria dos solos tropicais, representa boa parte do C humificado do solo (Benites et al., 2003).

O fracionamento químico da MOS (Schnitzer, 1978; Kumada, 1987; Frimmel & Christman, 1987; Stevenson & Cole, 1999) consiste na extração de SHs do solo baseada na diferença de solubilidade em soluções ácidas e alcalinas, (Stevenson & Cole, 1999; Roscoe et al., 2002) e posterior obtenção de três principais componentes: ácido húmico (FAH), que é solúvel em extrato alcalino, mas precipita-se sob acidificação; ácido fúlvico (FAF), que é a fração que permanece em solução quando o extrato alcalino é acidificado e humina (HUM) que é a fração que não pode ser extraída de solos e sedimentos por diluição ácida ou básica, ou seja, é o resíduo da separação das outras duas frações.

Para obtenção dessas frações e comparação dos resultados com outros trabalhos, é adotado o método da Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (Swift, 1996) adaptado por Benites et al. (2003). Vários trabalhos tem usado o fracionamento químico da matéria orgânica como indicador de qualidade do solo, como Barreto et al., (2008) avaliando os estoques de C orgânico total (COT) e suas frações como indicadores da qualidade de solo sob Mata Atlântica submetido a diferentes manejos, e Lima et al. (2008) estudando o impacto do cultivo de eucalipto nos estoques de C das frações da MOS. A caracterização das SHs e suas proporções na MOS são, portanto, essenciais para entender a sustentação dos diferentes sistemas agrícolas, o ciclo global do carbono, a lixiviação de espécies químicas que causam a poluição das águas e empobrecimento do solo (Bayer et al., 2002).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e Caracterização das Áreas de Estudo

O estudo foi realizado na sub-bacia do ribeirão Cachimbal, situada à margem direita do rio Paraíba do Sul, na região do Médio Paraíba (Figura 1). A área (Figura 1) está localizada entre as latitudes 22°33'S e 22°38'S e entre as longitudes 43°57'W e 44°05'W. Geopoliticamente a sub-bacia compreende os municípios de Pinheiral, Piraí e Volta Redonda-RJ, sendo cortada, transversalmente, pela BR 116 (Rodovia Presidente Dutra), principal eixo econômico do país.

O clima da região, de acordo com Köppen foi identificado como Am – clima tropical chuvoso, de monção, com inverno seco. A área está inserida no domínio ecológico da Mata Atlântica, cuja vegetação original é identificada como de Floresta Estacional Semidecidual Submontana (IBGE, 1992; CONAMA, 1994), característica de zonas de altitudes entre 300 e 800 metros.

Os solos identificados nas seis unidades de estudo foram classificados como CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distrófico típico, uma das classes predominantes nas cotas mais altas da sub-bacia. Estes solos, por terem sido formados a partir do intemperismo de rochas ácidas, principalmente gnaisse, e pelo relevo predominante de encostas com declividades variando de 35 a 70 %, apresentam como principais características: avançado grau de intemperismo, drenagem moderada a acentuada, facilmente erodíveis e em geral pouco férteis (Menezes, 1999). Estas características aliadas ao manejo inadequado das áreas são responsáveis pelo elevado índice de degradação atual das terras da sub-bacia em estudo.



**Figura 1.** Localização das áreas de estudo, Pinheiral (RJ). Capturada em 23/11/2011.

Legenda: Floresta Secundária estágio avançado (FSEA), Floresta secundária estágio médio (FSEM), Floresta secundária estágio inicial (FSEI), Pasto manejado médio (PMM), Agricultura perene (*Citrus*) e Agricultura anual (AA) (*Manihot esculenta*).

Assim como toda região do médio vale do Paraíba do Sul, a primeira forma de uso da área foi o extrativismo, sendo posteriormente substituída, no período colonial, pela cultura do café. Progressivamente as lavouras cafeeiras foram substituídas pela pecuária extensiva, cujo manejo inadequado contribuiu para a formação da paisagem que hoje domina a região. Os fragmentos florestais remanescentes são pequenos e localizam-se nos interflúvios das principais bacias hidrográficas e em áreas de difícil acesso, cujo relevo não permitiu a utilização agrícola. O município de Pinheiral possui, em termos percentuais, apenas 10,2% de território ocupado por vegetação florestal secundária, inexistindo remanescentes primários, e 83,4% de pastagens (CIDE, 2002).

A região apresenta várias formas de relevo com distintos graus de dissecação. A altitude varia de 360 metros na grande várzea do Paraíba do Sul, foz do ribeirão Cachimbal, até 720 metros na serra do Arrozal, no interflúvio ao sul da bacia do ribeirão Cachimbal (Oliveira e Brito, 1998).

Na área de abrangência do ribeirão Cachimbal, predominam encostas com declividades variadas (72,0 %), poucas áreas de topos de morros aplainados (5,7 %) e várzeas estreitas (22,3 %) nos vales estruturais da bacia e às margens de seu canal principal (Oliveira, 1998).

A cobertura de solo atual da região é constituída por pastagens, tanto as implantadas (principalmente *Brachiaria sp.*) como as não manejadas (capim-gordura – *Melinis minutiflora*– *Hyparrhenia rufa*, sapê – *Imperata brasiliensis*, capim rabo-de-burro – *Andropogon bicornis*, grama batatais – *Paspalum notatum*, outras gramíneas e leguminosas nativas), que se apresentam em diferentes estádios de degradação, nível de uso e/ou abandono, dando origem às demais formas de vegetação da área, como os pastos sujos e as capoeiras.

Para o estudo foram selecionadas seis áreas: Floresta Secundária de Estádio Avançado (FSEA), Floresta Secundária Estádio Médio (FSEM), Floresta Secundária de Estádio Inicial (FSEI), área de Pasto Manejado Misto (PMM), Agricultura Perene (AP), e Agricultura Anual (AA) (Figura 2).

Em cada uma das unidades de estudo foi delimitada uma parcela de 20 x 20 metros, localizada no terço médio da encosta, onde foram abertas trincheiras para caracterização e classificação do solo buscando-se a ocorrência de uma mesma classe de solo em todas as feições.

A classificação dos solos foi realizada segundo Embrapa (2006) e os perfis foram descritos segundo Santos et al. (2005).

Os valores médios de precipitação ocorridos durante a época das coletas são apresentados na Figura 3 e Tabela 1.





FSEA (a)



FSEM (b)



FSEI (c)



PMM (d)

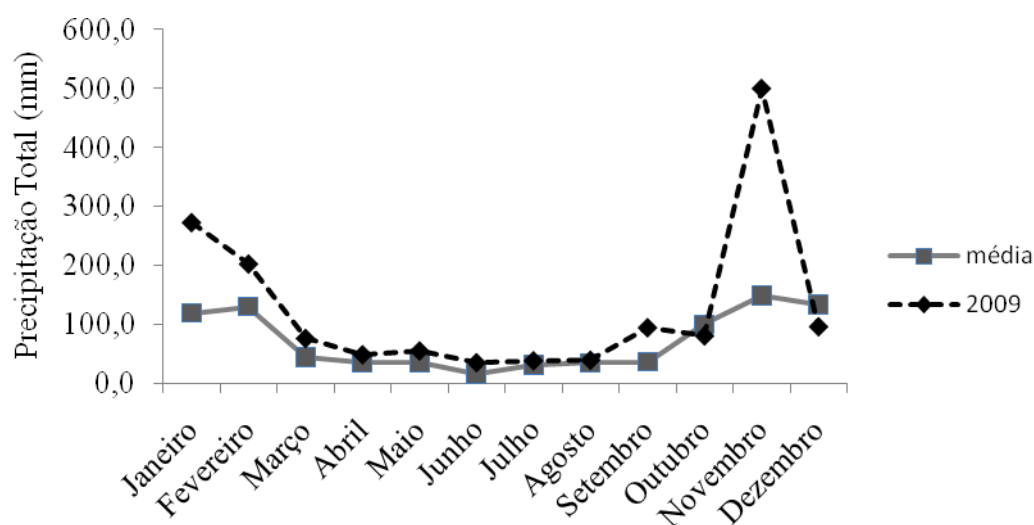


AP (e)



AA (f)

**Figura 2.** Caracterização das áreas de estudos em Pinheiral (RJ), (a) Floresta Secundária estágio avançado (FSEA), (b) Floresta secundária estágio médio (FSEM), (c) Floresta secundária estágio inicial (FSEI), (d) Pasto manejado misto (PMM), (e) Agricultura perene (AP) (*Citrus*) e (f) Agricultura anual (AA) (*Manihot esculenta*).



**Figura 3.** Média de precipitação total dos anos de 2006 a 2008 e precipitação total do ano de 2009.  
Fonte: INMET, 2009

**Tabela 1.** Precipitação total (mm) no município de Pinheiral-Rio de Janeiro.

| Mês/Ano      | 2006          | 2007         | 2008         | 2009          |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Janeiro      | 156,9         | 157,5        | 41,2         | 272,2         |
| Fevereiro    | 83,3          | 104,7        | 0,30         | 202,0         |
| Março        | 68,2          | 51,0         | 10,7         | 76,16         |
| Abril        | 24,9          | 55,5         | 20,8         | 48,51         |
| Maio         | 34,1          | 45,4         | 25,6         | 55,0          |
| Junho        | 6,20          | 11,1         | 28,2         | 35,16         |
| Julho        | 42,7          | 31,7         | 16,0         | 38,34         |
| Agosto       | 28,2          | 2,70         | 71,2         | 39,32         |
| Setembro     | 46,3          | 11,7         | 49,7         | 94,35         |
| Outubro      | 123,2         | 70,0         | 105,0        | 80,4          |
| Novembro     | 202,9         | 96,7         | 145,8        | 499,0         |
| Dezembro     | 162,7         | 21,2         | 213,7        | 96,0          |
| <b>Total</b> | <b>1179,5</b> | <b>659,0</b> | <b>728,1</b> | <b>1536,4</b> |

Fonte: INMET, 2009

## 3.2 Atributos Físicos do Solo

### 3.2.1 Composição granulométrica

As amostras de solo foram dispersas com NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> e homogêneas, em baixa rotação, por 16 horas, conforme modificação proposta por Rezende (1979). O teor de argila total foi determinado na suspensão, pelo método da pipeta (Day, 1965). As frações de areia grossa e areia fina foram separadas por tamisação, em peneiras de malha 0,2 e 0,053 mm, respectivamente. O silte foi obtido por diferença.



### 3.2.2 Densidade do solo (Ds)

A amostragem para determinação da Ds foi feita com o auxílio do coletor de Uhland. Após a coleta o material foi seco em estufa 105°C até a obtenção de massa constante. A densidade foi calculada pela seguinte equação:

$$D_s = \text{densidade do solo (Mg m}^{-3}\text{)} = M_s / V_s;$$

onde  $M_s$  (massa do solo) em Mg e  $V_s$  (volume do solo) em  $\text{m}^{-3}$ .

### 3.2.3 Macro e microporosidade

Foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, utilizando-se o coletor Uhland e anéis de PVC. A macroporosidade e a microporosidade foram determinadas pelo método da mesa de tensão (Embrapa, 1997).

### 3.2.4 Estabilidade dos agregados e carbono orgânico dos agregados

Foram calculados o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados.

Foram coletadas amostras indeformadas e transportadas para laboratório. Em seguida foram passadas por peneiras de 8 e 4 mm de diâmetro de malha. A distribuição dos agregados, por classes de diâmetro médio foi obtida submetendo-se as amostras ao peneiramento via úmida (Embrapa, 1997). Para isso, foram pesadas amostras de 25 g, que ficaram retidas na peneira de 4 mm, umedecidas com borrifador, colocadas no jogo de peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105mm, e submetidas à agitação vertical no aparelho de Yooder, durante 15 minutos. Após o tempo determinado, o material retido em cada peneira foi retirado, separado com o auxílio de jato d'água, colocado em placas previamente pesadas, identificadas, e levado à estufa (65°C) até massa constante. Após a secagem, obteve-se a massa dos agregados retida em cada peneira. A partir dos dados de massa de agregados foram calculados o DMP e o DMG dos agregados.

O diâmetro médio ponderado (DMP) foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$DMP = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i)}$$

Onde:

$n$  = número de classes de tamanho de agregado

$i$  = intervalo de classe:  $8,0 \geq X > 2,0$  mm, de  $2,0 \geq X > 1,0$  mm, de  $1,0 \geq X > 0,5$  mm, de  $0,5 \geq X > 0,25$  mm e de  $0,25 \geq X > 0,105$  mm;

$x_i$  = é o diâmetro do centro de classe (mm);

$w_i$  = é a razão entre a massa de agregados dentro da classe ( $x_i$ ) e a massa total de agregados.

O diâmetro médio geométrico (DMG) foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$DMG = \exp \left\{ \frac{\sum w_i \ln x_i}{\sum w_i} \right\}$$

Onde:

$w_i$  = peso dos agregados de cada centro de classe (g);

$\ln$  = logaritmo natural de  $x_i$ ;

$x_i$  = diâmetro do centro de classe (mm).

O teor de carbono nos agregados (COAGR) foi determinado no material retido nas peneiras de 2,00 e 1,00 mm. Este foi seco em estufa, triturado em almofariz, peneirado em

peneira de 60 mesh e pesado 0,3 g. O teor de carbono orgânico foi determinado segundo Yeomans & Bremner (1988).

### 3.2.5 Resistência do solo à penetração

Para validar os dados obtidos com o GPR foi utilizado penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf com ângulo de cone de 30° (Stolf, 1991). Esse instrumento permite determinar a resistência do solo à penetração de uma haste de aço após o recebimento de impacto provocado por êmbolo de ferro na sua parte superior (Costa & Nishiyama, 2007; Roppa, 2009). Para transformação da leitura de resistência a penetração da haste do equipamento (cm/impacto) foi usada a seguinte equação:

$$RP = \frac{M \cdot g \cdot h}{A \cdot x} \times \frac{M}{M + m} + \frac{M + m}{A} \times g$$

Onde: RP = resistência à penetração (Pa); M = massa do êmbolo (3,98 kg); m = massa do aparelho sem êmbolo (3,44 kg); g = aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>); h = altura de queda do êmbolo (0,40 m); A = área do cone que penetra no solo; e x = distância de penetração após cada impacto (m).

O número de impactos por decímetro (dm) na camada de 0-50 cm de profundidade, com cinco repetições em cada ponto de leitura do GPR, foi medido e quantificada a variação de resistência do solo a penetração para comparar com resultados dos radargramas. O número de impactos por dm foi transformado para kgf cm<sup>-2</sup>, pela equação:  $R(\text{kgf cm}^{-2}) = 5,8 + 66,20N$ , onde N é o número de impactos por dm (Stolf, 1991)

Uma questão que tem dificultado bastante o uso de penetrômetros é a dependência da resistência à penetração com a umidade, para isso é recomendado que se faça as medidas em condições de umidades nem muita alta, nem muito baixas, preferencialmente dentro da capacidade de campo (Costa, 2007).

Para determinação da umidade do solo foram coletadas amostras terra, com a umidade presente no momento da coleta, estas foram colocadas em sacos hermeticamente fechadas, para que se mantivesse com a umidade real. As amostras foram levadas para laboratório e a umidade foi determinada pelo método gravimétrico, que consiste em pesar a amostra úmida, depois colocada em estufa a 105°C até obtenção de massa constante, e pesa novamente a amostra seca depois aplica os valores encontrados na seguinte formula:

$U_g = \frac{M_u - M_s}{M_t}$ , onde:  $U_g$ - umidade gravimétrica;

$M_u$ - massa úmida;

$M_s$ - massa seca;

$M_t$ - massa total.

A variação dos estados de umidade gera tantas alterações no comportamento da consistência do solo devido à grande alteração que esta causa nas forças de coesão e adesão.

### 3.3 Emprego do Georadar

A avaliação foi realizada no mês de agosto de 2010, usando o radar de penetração no solo modelo TerraSIRch SIR-3000, com antena de frequência central de 900 MHz. Segundo Boniak et al. (2008) essa antena apresenta melhor resolução para solos rasos. O GPR foi programado para detectar 512 amostras por traço (representação gráfica do sinal adquirido), 16 bits por amostra e alcançar na prospecção 17,5 nanossegundos. A antena foi orientada perpendicularmente a direção dos perfis e os dados foram coletados de maneira contínua, com a varredura de 8 m em cada transecto.

O processamento e interpretação das imagens de radar (radargramas) foram realizados usando o programa “Advanced Radar Data Analysis” (RADAN 6.6). Para cada radargrama de cada transecto, foram feitos os seguintes procedimentos: inicialmente, realizou-se a correção

de posição (ajuste de off-set) para zero, para ajustar a onda direta emitida pelo GPR com a superfície do solo. Em seguida, os sinais obtidos foram convertidos para o campo de frequência, onde se observou o intervalo do espectro em que a maior parte do sinal estava concentrada. Esta etapa foi necessária para a seleção do filtro a ser aplicado em cada radargrama, sendo optado pelo Filtro de Impulso Finito (FIR) que permite filtrar as frequências selecionadas sem deslocar as reflexões no tempo ou na posição (GSSI, 2008). Para a filtragem foram selecionadas frequências que variaram entre 400 e 1200 MHz para os dados obtidos pela antena de 900 MHz.

Como o uso do filtro diminui a energia do sinal, foi aplicado ganho automático com valor de 2 pontos, que amplificou os sinais de baixa e alta amplitude. A conversão de tempo (nanossegundos) para profundidade (metros) foi feita por calibração de um refletor com profundidade conhecida, método utilizado por Hinkel et al. (2001).

A propagação de uma onda eletromagnética de alta frequência no terreno pode ser descrita pela sua velocidade e a atenuação sofrida durante o percurso (Davis & Annan, 1989). Em condições de baixa perda, a velocidade ( $v$ ) está relacionada com a parte real da constante dielétrica ( $K$ ) do meio de propagação, sendo dada pela seguinte expressão:

$$V = c / \sqrt{k}, \text{ onde } c \text{ é velocidade da onda eletromagnética no espaço livre.}$$

A calibração consistiu em comparar o tempo das reflexões nos perfis de radar com as profundidades avaliadas com o penetrômetro. Dessa forma foi estimada a velocidade de propagação do pulso, estabelecendo-se a escala de profundidade no radargrama. Finalmente, foi feita a transformação de cor e indicou-se novo ganho, mas apenas de visualização, promovendo maior contraste entre as reflexões para facilitar a interpretação dos resultados.

### 3.4 Tomografia Computada

Foram coletadas amostras indeformadas utilizando cilindros de acrílico, com de 64 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, na profundidade de 0-20 cm em todas as áreas, após a coleta as amostras foram enviadas ao laboratório *Soil and Landscape Process* da Universidade de Guelph, Guelph no Canadá, coordenado pelo professor Dr. Richard J. Heck. No laboratório as amostras foram devidamente identificadas, e ainda dentro do cilindro foram secas ao ar por 72 horas para que nos espaços vazios permaneça apenas ar e não água, o que facilitou a etapa de segmentação. Após essa etapa, em cada amostra, foi colocado o suporte de polietileno para fixação da amostra no aparelho, e os padrões de ar e água que foram posicionados de maneira que fiquem entre a fonte de raios X e a amostra devido à atenuação dos raios.

O raio que passa pela amostra é submetido à atenuação progressiva, que reflete a densidade atômica de cada constituinte da amostra. Com a inclusão dos padrões de ar e água são criados espaços dentro de cada amostra com a certeza de estar incluindo apenas ar e água. Então estas regiões foram identificadas durante a reconstrução da imagem, atribuindo os valores de -1000 UH para ar e de 0 UH para água. Com isso é possível distinguir na imagem os constituintes da amostra (Elliot & Heck, 2007). Áreas de alta densidade atômica (sólida) são representadas por tons de cinza mais claro, e áreas de baixa densidade (vazios) são representados por preto. Diante disto uma das mais fáceis interpretações de dados de amostras de solo obtidos por tomografia computada (TC) é a relação de espaço poroso, devido o forte contraste entre a fase sólida e vazio (Taina et al., 2008).

Para cada pixel dentro em uma imagem em tons de cinza obtidos pela TC é atribuído um número que é usado para descrever a atenuação dos raios X de cada voxel em uma imagem de modelo 3D (Eliot & Heck, 2007), esse número é chamado de Unidade de Hounsfield (UH). A UH de um voxel, tendo  $\mu$  como um coeficiente de atenuação linear, é gerado usando a seguinte equação:

$$UH = 1000 (\mu - \mu_w) / (\mu_w - \mu_a)$$

Onde:  $\mu_w$  e  $\mu_a$  são coeficientes de atenuação linear da água e do ar, respectivamente. A escala Hounsfield atribui à água destilada o valor arbitrário de 0 UH, e para ar o valor de -1000UH (Hounsfield, 1973).

Com esses dois pontos de referência é possível atribuir UH relativa, números de TC e os constituintes de uma amostra em várias fases.

Finalmente, as amostras são posicionadas uma a uma, dentro do aparelho GE Medical  $\mu$ CT, model MS8X-130 de terceira geração, para a aquisição das imagens em duas dimensões (2D) por meio do protocolo 120kV, 170 $\mu$ A, 3500mS.

O modelo tridimensional das imagens foi reconstruído utilizando o software GE Medical, explore Reconstruction Utility (GE Healthcare, 2005). O modelo foi reconstruído com a resolução de 6 $\mu$ m com um volume resultante de 600x600x600 voxels, contendo 219 milhões de voxels. A pós-reconstrução das imagens foi feita utilizando o software GEHC MicroView Version 2.0.29 para remover ruídos inerentes às imagens adquiridas (GE Healthcare, 2005; Elliot et al, 2010). Um algoritmo de suavização Gaussiano, de raio 1, foi finalmente aplicado a fim de eliminar pontos distantes dentro do conjunto de dados para melhorar o contraste das imagens em tons de cinza. Então os modelos foram reconstruídos com o software Imagej que é baseado em linguagem Java e proporciona um bom ambiente para os usuários que trabalham com exibição de imagens, aprimoramento, aplicações de filtros, operações geométricas e matemáticas medidas com médias e desvio padrão (Rajab et al., 2008).

O modelo de segmentação (*Segmentation*) utilizado foi proposto por Elliot & Heck (2007) e Schluter, et al., (2010), porém só esse modelo não foi suficiente para determinar de maneira eficiente o limiar entre os espaços poroso e os sólidos. Então, foi proposta a seguinte adaptação ao método, a imagem gerada na etapa de reconstrução foi exportada para o software imagej e obtidos os valores de frequência que foram importados para a planilha eletrônica no software Origin Pro Version 7.5 (OriginLab Corporation, 2004). Neste software dois picos foram definidos, o primeiro representado por vazios e o segundo, com maior atenuação, provavelmente por material mineral pouco intemperizado presente no solo. Depois de identificadas as curvas foram determinadas os pontos equi-probabilidade, que ocorre entre a interseção da tangente do primeiro e do segundo pico (Elliot & Heck, 2007), e os valores máximos e mínimos para determinação do limiar (*threshold*) entre sólidos e poros.

A imagem original foi importada com o software Imagej, onde definido o valor máximo e mínimo de poros e sólidos com os valores encontrados na etapa anterior.

A escolha ideal de um valor limiar entre poros e sólidos depende da característica de transição dos valores de cinza quando atravessar a fronteira entre poros e sólidos. Portanto, a primeira abordagem é selecionar a área de transição e em seguida analisar o histograma (Gonzalez & Woods, 2002). Em uma primeira etapa foram usados filtros para identificar regiões de gradientes com elevada intensidade, e foram usados filtros para detecção das bordas (Pratt, 1991; Gonzalez & Woods, 2002), como *Sobel* e *Laplacian* que são baseados na primeira e na segunda derivada local de valores e cinza. O filtro *Sobel* é sensível à zona de transição, enquanto o filtro *Laplacian* distingue o início com valores positivos e o final com valores negativos. O *Laplacian* é frequentemente aplicado a uma imagem que tenha sido previamente alisada com filtro Gaussiano, a fim de reduzir a sua sensibilidade ao ruído, portanto, as duas variantes serão descritas em conjunto. Ele normalmente usa uma imagem de um nível de cinza como entrada e produz outra imagem com nível de cinza modificado como saída. (Schluter et al., 2010).

Na próxima etapa as zonas de transição entre poros e sólidos precisam ser identificadas, o que leva a outro *threshold*. As imagens geradas com filtro *Sobel* e *Laplacian* apresentam distribuição unimodal, o que complica novamente a separação das bordas entre poros e sólidos. Rosin (2001) propôs um método simples para encontrar curva característica

de um histograma unimodal por triangulação. A linha imaginária é criada a partir do modo de distribuição máxima. A máscara binária resultante os altos valores de gradiente acima dos limiares são identificados com valor 1. A região identificada pelo filtro *Sobel* é ainda mais reduzida por uma erosão morfológica de um pixel que se concentra na parte central da zona de transição.

A última etapa é determinar o *threshold*  $T_{\min}$  e  $T_{\max}$  do bi-nível do processo de segmentação introduzido por Vogel e Kretzschmar (1996) que podem ser baseados nas máscaras introduzidas anteriormente, os filtros *Sobel* e *Laplacian*. No caso deste trabalho foram utilizados os valores de  $T_{\min}$  e  $T_{\max}$  encontrados com o software OriginPro, como citado anteriormente no início de todo processo. Finalmente, foram geradas imagens em tons de cinza, com a separação mais adequada dos poros e sólidos. Dentre isto, ao final de todo processo pode-se analisar as variáveis Porosidade, Densidade do solo (DS), e Densidade dos Agregados (DA).

### 3.5 Atributos Químicos do Solo

As amostras após coleta foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de malha. Nestas foram realizadas as seguintes análises: a) pH em água na relação 1:2,5 (solo:água); b) Ca, Mg, Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, analisados por titulometria; c) P, K e Na extraídos pelo método Mehlich-1 e analisados por colorimetria e fometria de chama, respectivamente, d) H+Al avaliados por meio de solução de acetato de cálcio 0,5 mol.L<sup>-1</sup>. Todos os métodos se encontram descritos em Embrapa (1997).

As substâncias húmicas foram avaliadas segundo (Swift, 1996), de acordo com a técnica adaptada e apresentada por Benites et al. (2003), extraindo-se as frações húmica – fração insolúvel em meio alcalino, ácido húmico – fração escura extraída geralmente em meio alcalino (NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>) e insolúvel em meio ácido diluído, ácido fúlvico – fração colorida solúvel em meio alcalino que permanece na solução após a remoção dos ácidos húmicos por acidificação (Stevenson, 1994). O carbono orgânico total foi determinado segundo Yeomans & Bremner (1988).

### 3.6 Análises Estatísticas

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, sendo as seis áreas, a saber: Floresta secundária de estágio avançado, floresta secundária estágio médio, floresta secundária de estágio inicial, área de pasto manejado misto, agricultura perene e agricultura anual com cinco repetições.

Para os dados das propriedades químicas e físicas do solo, de cada profundidade (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) foi feita avaliação da normalidade dos dados (Lilliefors), homogeneidade das variâncias dos erros pelo Teste de Cochran & Bartlett. Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e os valores médios comparados entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade, com o auxílio do programa estatístico SAEG versão 5.0 (Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas – Universidade Federal de Viçosa).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise Granulométrica

Os dados de granulometria e a classe textural das áreas são apresentados na Tabela 2. A textura do solo apresentou apenas pequenas variações entre as diferentes áreas, mantendo-se, de modo geral, dentro da classe franco argilo arenosa. Tal distribuição uniforme pode ser devido à semelhança do material de origem nas diferentes áreas e ao fato de que a textura é uma das características mais estáveis do solo (Oliveira et al., 1992).

**Tabela 2.** Análise granulométrica e classe textural nas diferentes áreas avaliadas.

| Áreas* | Granulometria g kg <sup>-1</sup> |       |       | Classe Textural       |
|--------|----------------------------------|-------|-------|-----------------------|
|        | Argila                           | Areia | Silte |                       |
|        | Prof. (cm)                       |       |       |                       |
|        | <b>0-5</b>                       |       |       |                       |
| FSEA   | 240                              | 650   | 110   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEM   | 290                              | 540   | 170   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEI   | 330                              | 490   | 180   | Franco-argilo-arenosa |
| PMM    | 260                              | 550   | 190   | Franco-argilo-arenosa |
| AP     | 230                              | 620   | 150   | Franco-argilo-arenosa |
| AA     | 230                              | 630   | 140   | Franco-argilo-arenosa |
|        | <b>5-10</b>                      |       |       |                       |
| FSEA   | 300                              | 560   | 140   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEM   | 300                              | 500   | 200   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEI   | 300                              | 540   | 160   | Franco-argilo-arenosa |
| PMM    | 270                              | 560   | 170   | Franco-argilo-arenosa |
| AP     | 270                              | 580   | 150   | Franco-argilo-arenosa |
| AA     | 290                              | 550   | 160   | Franco-argilo-arenosa |
|        | <b>10-20</b>                     |       |       |                       |
| FSEA   | 340                              | 520   | 140   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEM   | 310                              | 500   | 190   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEI   | 340                              | 490   | 170   | Franco-argilo-arenosa |
| PMM    | 290                              | 540   | 170   | Franco-argilo-arenosa |
| AP     | 310                              | 570   | 120   | Franco-argilo-arenosa |
| AA     | 310                              | 580   | 110   | Franco-argilo-arenosa |
|        | <b>20-40</b>                     |       |       |                       |
| FSEA   | 330                              | 500   | 170   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEM   | 340                              | 450   | 210   | Franco-argilo-arenosa |
| FSEI   | 340                              | 470   | 190   | Franco-argilo-arenosa |
| PMM    | 320                              | 550   | 130   | Franco-argilo-arenosa |
| AP     | 320                              | 540   | 140   | Franco-argilo-arenosa |
| AA     | 290                              | 590   | 120   | Franco-argilo-arenosa |

\*Legenda: FSEI – Floresta Secundária Estádio Inicial; FSEM – Floresta Secundária Estádio Médio; FSEA – Floresta Secundária Estádio Avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

A homogeneidade na classe textural tornou possível a comparação dos atributos edáficos nas áreas de estudo.

## 4.2 Porosidade e Densidade do Solo

A distribuição da porosidade (macro e microporosidade) e os valores de densidade do solo (Ds) das áreas avaliadas são apresentados na Tabela 3 e 4. Em relação à Ds, observa-se que nas áreas de AP e AA ocorreram os maiores valores deste atributo nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm tanto na estação chuvosa quanto seca e na profundidade 10-20 cm na estação seca, não foram observadas diferenças entre estas áreas. Estes resultados podem estar relacionados com o manejo utilizado nestas áreas. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2006) avaliando 4 áreas: plantio de mandioca, bananal agroflorestal, área de capoeira e floresta secundária, em que encontrou os maiores valores de densidade na área de plantio de mandioca, o autor associou os resultados aos menores teores de matéria orgânica encontrados nesta área e a maior ação antrópica. Solos com maiores valores de densidade apresentam impedimentos para o desenvolvimento das plantas, assim como maior resistência a infiltração da água.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Islam & Weil (2000), em estudo que teve como objetivo avaliar e comparar as mudanças nas propriedades na camada de 0-15cm de um solo classificado como Typic Paleustults (Argissolo) sob cobertura florestal nativa tropical decídua, reflorestamento, pastagem e agricultura anual no distrito de Gazipur, divisão de Dhaka, Bangladesh, onde constataram um valor médio da Ds significativamente maior em área cultivada comparada com solo sob floresta natural.

Analisando os valores de densidade nas duas estações (Tabela 3) observa-se uma redução na Ds na estação seca e aumento da macroporosidade, em todas as áreas avaliadas. Esta redução da Ds (aproximadamente 18%) ocorrida na área de AA deve estar relacionada ao considerável revolvimento do solo durante a colheita da mandioca entre as duas estações.

**Tabela 3.** Valores médios de densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) em áreas sob diferentes coberturas vegetais na estação chuvosa mês de dezembro e seca mês de agosto.

| Áreas<br>** | Profundidade (cm) / Atributo avaliado |                      |         |         |                      |                      |                      |                      |
|-------------|---------------------------------------|----------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|             | 0-5                                   |                      | 5-10    |         | 10-20                |                      | 20-40                |                      |
|             | Chuvos<br>a                           | Seca                 | Chuvosa | Seca    | Chuvosa              | Seca                 | Chuvosa              | Seca                 |
|             | <b>Ds (<math>Mg\ m^{-3}</math>)</b>   |                      |         |         |                      |                      |                      |                      |
| <b>FSEA</b> | 1,15 B <sup>ns</sup>                  | 1,13 B <sup>ns</sup> | 1,28 Ba | 0,96 Bb | 1,34 Ba              | 1,08 Ab              | 1,38 Ba              | 1,14 Bb              |
| <b>FSEM</b> | 1,28 B <sup>ns</sup>                  | 1,23 B <sup>ns</sup> | 1,16 Bb | 1,34 Ba | 1,35 Ba              | 1,18 Ab              | 1,49 Aa              | 1,30 Ab              |
| <b>FSEI</b> | 1,19 B <sup>ns</sup>                  | 1,22 B <sup>ns</sup> | 1,34 Ba | 1,16 Bb | 1,39 B <sup>ns</sup> | 1,33 A <sup>ns</sup> | 1,41 B <sup>ns</sup> | 1,35 A <sup>ns</sup> |
| <b>PMM</b>  | 1,18 Ba                               | 1,06 Bb              | 1,34 Ba | 1,08 Bb | 1,44 B <sup>ns</sup> | 1,28 A <sup>ns</sup> | 1,50 Aa              | 1,05 Bb              |
| <b>AP</b>   | 1,41 Aa                               | 1,30 Ab              | 1,51 Aa | 1,24 Ab | 1,52 A <sup>ns</sup> | 1,36 A <sup>ns</sup> | 1,55 Aa              | 1,27 Ab              |
| <b>AA</b>   | 1,47 Aa                               | 1,21 Ab              | 1,50 Aa | 1,20 Ab | 1,58 Aa              | 1,22 Ab              | 1,51 Aa              | 1,34 Ab              |

\*Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade;

\*\*Letras minúsculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade; ns-não significativo;

\*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual.

As áreas de FSEA e PMM apresentaram os menores valores de Ds nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm e altos valores de macroporosidade nessas mesmas profundidades. Para a profundidade de 20-40 cm, a área de PMM apresentou os maiores valores de macroporosidade. Este padrão está relacionado à ação mecânica das raízes das gramíneas que favorece a deposição de material orgânico e, conseqüentemente, aumenta a agregação e porosidade do solo e diminui a Ds (Pinheiro et al., 2004). Segundo Pinheiro et al. (2004), a atividade do sistema radicular das gramíneas, associado à ausência de revolvimento do solo, contribui efetivamente para formação de macroagregados estáveis em água. Para a área de FSEA o resultado observado pode ser decorrente da baixa interferência antrópica, vários

autores (Borges et al., 1999; Silva et al., 2006) destacam que solos não cultivados tendem a apresentar menores valores de densidade.

Os altos valores de Ds em profundidade nessas mesmas áreas são decorrentes do manejo do solo, cujo preparo foi realizado com implementos e máquinas pesadas (trator de esteira), e ao trânsito de animais com maior porte (bovinos e eqüinos) associado também a maior proporção da fração areia em detrimento a fração argila (Menezes, 2008).

**Tabela 4** Valores médios de macro e microporosidade (%) em áreas sob diferentes coberturas vegetais na estação chuvosa mês de dezembro e seca mês de agosto.

| Áreas*   | Profundidade (cm) / Atributo avaliado |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|--|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|  | 0-5                                   |                     | 5-10                |                     | 10-20               |                     | 20-40               |                     |
|  | Chuvosa                               | Seca                | Chuvosa             | Seca                | Chuvosa             | Seca                | Chuvosa             | Seca                |
| <b>Macroporosidade (m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b> |                                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>FSEA</b>  | 1,1 Ab                                | 1,5 Aa              | 1,0 Ab              | 1,7 Aa              | 0,9 Ab              | 1,8 Aa              | 0,8 Ab              | 1,7 Aa              |
| <b>FSEM</b>  | 0,8 Ab                                | 1,3 Ba              | 0,8 Ca              | 0,3 Bb              | 0,7 Bb              | 0,9 Ba              | 0,2 Cb              | 1,1 Ba              |
| <b>FSEI</b>  | 0,2 Cb                                | 0,9 Ba              | 0,3 Cb              | 1,1 Ba              | 0,7 Bb              | 0,8 Ba              | 0,2 Cb              | 0,8 Ba              |
| <b>PMM</b>   | 1,2 Ab                                | 1,6 Aa              | 0,8 Bb              | 1,5 Aa              | 0,7 Bb              | 1,2 Ba              | 0,4 Bb              | 1,4 Aa              |
| <b>AP</b>  | 0,5 Bb                                | 1,8 Aa              | 0,4 Cb              | 2,0 Aa              | 0,2 Cb              | 1,8 Aa              | 0,7 Ab              | 1,8 Aa              |
| <b>AA</b>  | 0,9 Ab                                | 1,7 Aa              | 0,7 Bb              | 1,7 Aa              | 0,2 Cb              | 1,4 Ba              | 0,8 A <sup>ns</sup> | 1,1 B <sup>ns</sup> |
| <b>Microporosidade (m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</b> |                                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>FSEA</b>  | 4,0 Ba                                | 2,9 Bb              | 3,7 Ca              | 2,9 Bb              | 3,5 Ba              | 2,9 Bb              | 3,5 Ba              | 3,0 Bb              |
| <b>FSEM</b>  | 4,0 Bb                                | 4,7 Aa              | 4,0 B <sup>ns</sup> | 4,0 A <sup>ns</sup> | 3,8 B <sup>ns</sup> | 3,8 A <sup>ns</sup> | 4,0 A <sup>ns</sup> | 4,3 A <sup>ns</sup> |
| <b>FSEI</b>  | 4,8 A <sup>ns</sup>                   | 4,3 A <sup>ns</sup> | 4,6 A <sup>ns</sup> | 4,2 A <sup>ns</sup> | 4,6 Aa              | 4,2 Ab              | 4,4 A <sup>ns</sup> | 4,0 A <sup>ns</sup> |
| <b>PMM</b>   | 4,8 A <sup>ns</sup>                   | 3,7 B <sup>ns</sup> | 4,0 Ba              | 3,6 Ab              | 3,7 Ba              | 3,3 Bb              | 3,5 B <sup>ns</sup> | 3,3 B <sup>ns</sup> |
| <b>AP</b>  | 3,9 Ba                                | 3,0 Bb              | 3,8 B <sup>ns</sup> | 3,2 B <sup>ns</sup> | 3,5 Ba              | 2,9 Bb              | 3,6 Ba              | 2,8 Bb              |
| <b>AA</b>  | 3,5 Ca                                | 3,0 Bb              | 3,5 Ca              | 2,8 Bb              | 3,2 C <sup>ns</sup> | 2,9 B <sup>ns</sup> | 3,3 B <sup>ns</sup> | 3,1 B <sup>ns</sup> |

\*Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade;

\*\*Letras minúsculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade; ns-não significativo;

\*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual.

Já para as áreas de FSEM e FSEI, os menores valores de macroporosidade nas profundidades 5-10, 10-20 e 20-40 cm (Tabela 4), podem ser decorrentes dos cultivos agrícolas realizados nessas áreas antes que o processo de recuperação se instalasse. Em contra partida, o padrão observado na área de FSEA (menores valores de Ds e maiores de macroporosidade) está associado provavelmente ao maior tempo de recuperação desta área (Menezes, 2008).

A macroporosidade nas áreas AP e AA foi menor no período chuvoso, comparada com a área de FSEA e a área de PMM (0-5 cm). Araújo et. al. (2004) avaliando as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido a 20 anos de cultivo anual em Maringá, Paraná, tendo como referência uma área sob mata nativa, encontraram maiores valores de Ds e menores valores de macroporosidade na área cultivada em comparação a área de floresta. Os autores atribuíram essas diferenças ao tráfego pesado de máquinas e implementos agrícolas e também a redução dos teores de matéria orgânica que possivelmente contribuíram para a diminuição da estabilidade dos agregados nas áreas cultivadas. Os resultados observados neste estudo também são corroborados por Spera et al. (2006), que avaliaram os atributos físicos do solo sob sistemas de produção de grãos integrados com pastagens e sob floresta nativa e observaram maiores valores de macroporosidade na área florestal em comparação aos sistemas agrícolas até a profundidade de 15 cm.

A área de AA apresentou menores valores de microporosidade na profundidade 0-5 cm. Este padrão pode estar relacionado à menor quantidade de COT encontrado nesta área



(Tabela 6). Borges et. al. (1999) avaliando as propriedades físicas em LATOSSOLO VERMELHO verificaram que o solo cultivado com manga (*Mangifera indica L.*) apresentou 12% de microporos a menos que o solo sob mata nativa no horizonte A, sendo esse padrão associado aos menores teores de carbono orgânico e de argila encontrados nessa área. Silva & Kay (1997) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, originada do tráfego de máquinas, implementos.

Para as áreas de FSEA, FSEM, FSEI e PMM, devido ao acúmulo de serapilheira nas áreas de floresta e resíduos vegetais na área de pasto, na profundidade de 0-5cm (período chuvoso) foram verificados maiores valores de microporosidade, o que pode ser atribuído aos maiores teores de COT, decorrentes da maior adição de serapilheira nas áreas de floresta e resíduos vegetais na área de pasto. O maior acúmulo de serapilheira acarreta aumentos nos teores de matéria orgânica que por sua vez irão proporcionar menores valores de densidade em consequência menores valores de macroporosidade (Bertol et al., 2000).

### 4.3 Estabilidade dos Agregados

A distribuição dos agregados por diâmetro de malha é apresentada nas Figura 4 e 5, onde as áreas de Floresta e PMM, na profundidade de 0-5 cm e período chuvoso, têm maiores valores de massa dos agregados e o menor valor na área AP. Verifica-se que, quanto mais estáveis forem os agregados em água na classe de 2,00 mm, maior o valor da massa de agregados.

Nas classes de menor diâmetro, verificou-se tendência de maiores valores de massa de agregados nas áreas de AP e AA (0-5 cm) e FSEA e AP (5-10 cm) no período chuvoso. Este padrão demonstra que estas áreas possuem menores valores de DMP e DMG, com menores valores de massa de agregados na classe de maior diâmetro e, conseqüentemente, maiores valores de massa de agregados de menor DMP. Provavelmente os menores valores observados nas áreas AP e AA devem-se a maior exposição dos agregados e em função do manejo empregado nestas áreas, já na área de FSEA os menores valores são decorrentes do uso anterior da área, cultivo de café (*Coffea arabica*). Este fato indica que estas áreas possuem pior qualidade estrutural do solo quando comparadas com as demais áreas.

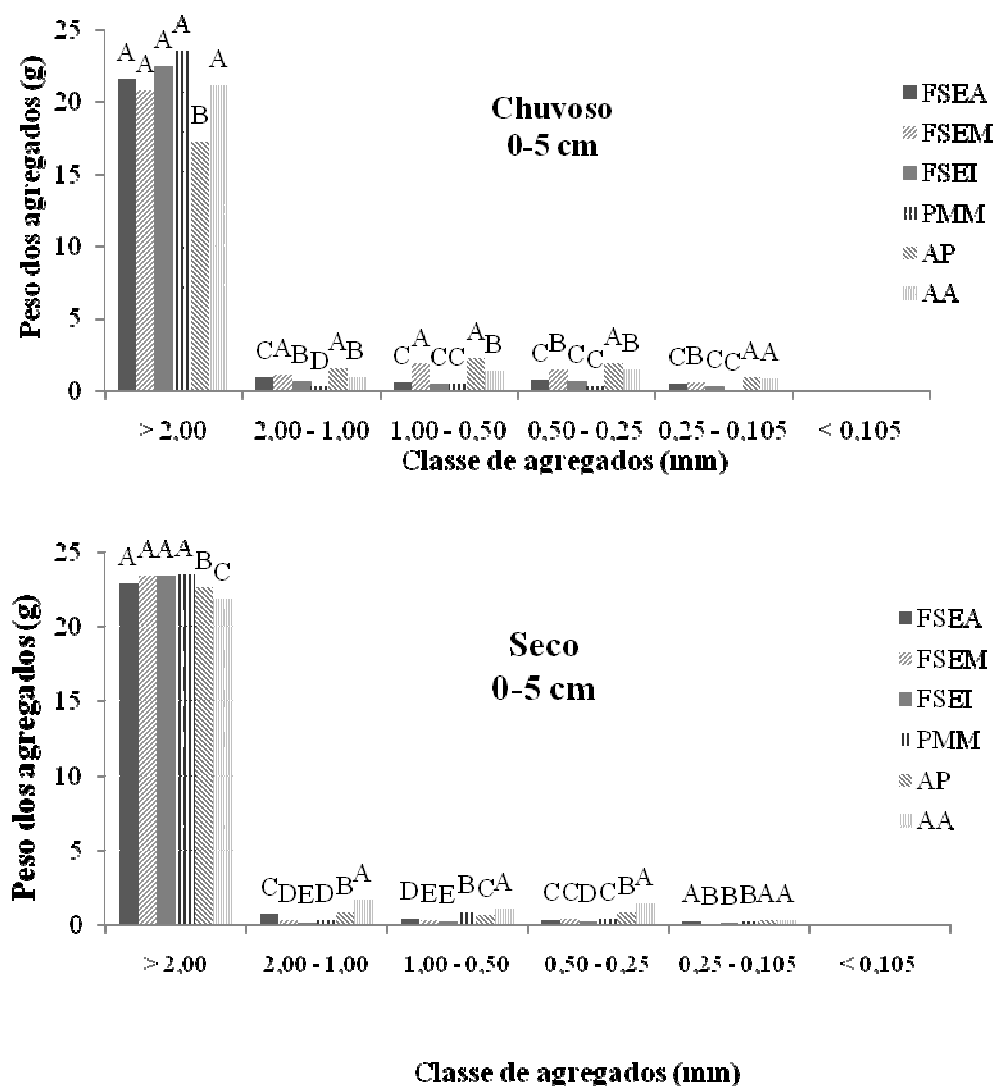
Entre as áreas de agricultura (AP e AA), foram observados maiores valores da massa de agregados na área de AA (0-5 cm) período chuvoso. Para a profundidade de 5-10 cm a área AA apresentou maiores valores de massa de agregados que a área de AP no período chuvoso e inverte no período seco. Este padrão pode ser atribuído ao emprego de gramíneas como cobertura de pousio, propiciando a formação de agregados mais estáveis em água quando comparado com a área de AP, onde não se verifica a presença de gramínea. Na área de AA no período seco, nas duas profundidades avaliadas, observa-se aumento na massa de agregados na classe de menor diâmetro, isto provavelmente se deve a ação antrópica decorrente da colheita mandioca.

A maior massa de agregados na peneira de 2,00 mm, nas seis áreas avaliadas pode ser decorrente dos maiores teores de matéria orgânica, comuns na camada superficial, beneficiando a formação de agregados de maior tamanho e maior estabilidade, associado à ação mecânica das raízes. Avaliando a distribuição dos agregados e carbono orgânico do solo em um LATOSSOLO VERMELHO sob plantio de hortaliças com diferentes sistemas de cultivo no município de Paty do Alferes-RJ, Pinheiro et al. (2004) encontraram resultados semelhantes relacionando a maior massa de agregados aos maiores teores de carbono orgânico quantificado nas camadas superficiais.

Os valores de DMP, DMG são apresentados na Tabela 5. Em relação aos índices de estabilidade dos agregados estáveis em água, DMP e DMG, pode-se verificar na profundidade de 0-5 cm na estação chuvosa que os maiores valores de DMP foram observados nas áreas de

FSEA (4,50 mm), FSEM (4,40 mm), FSEI (4,70 mm) e PMM (4,91 mm), intermediários na área de agricultura AA (4,23 mm) e menores na área de AP (3,77mm).

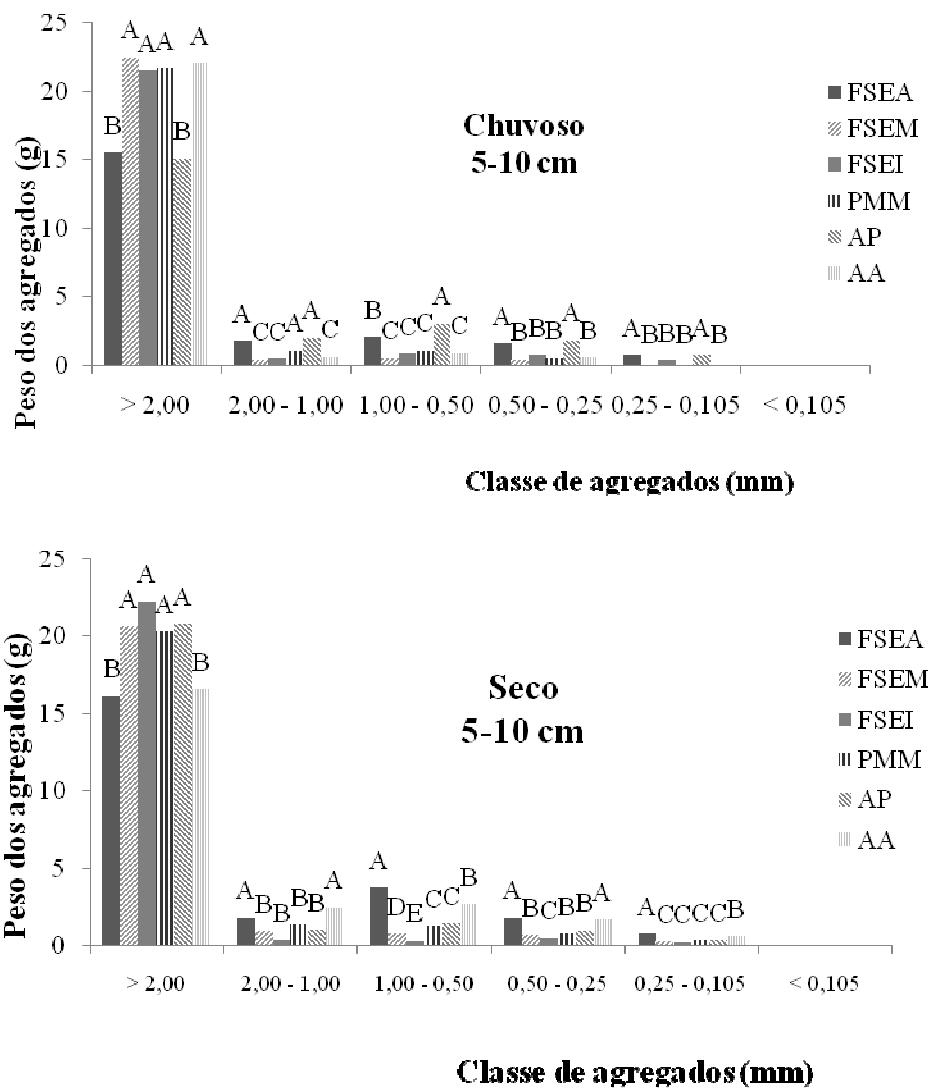
Nas áreas de floresta, tanto no período chuvoso quanto seco, os valores de DMP encontrados na profundidade de 0-5 cm, podem ser decorrentes do aporte de serapilheira nestas áreas, que elevam os teores de COT, como observado na Tabela 6, e na área de PMM o aumento no DMP se deve a ação mecânica e carbono oriundo da renovação do sistema radicular. A entrada de carbono no solo em áreas de pastagem perene acontece por meio da decomposição de raízes finas e a rizodeposição (Trujillo et al., 2006) e a formação de macroagregados parece estar relacionada à presença de raízes, que são mais abundantes sob pastagem com gramíneas (Salton, 2008).



**Figura 4.** Distribuição dos agregados estáveis em água por classe de tamanho no período chuvoso e seco na profundidade de 0-5 cm nas diferentes áreas no município de Pinheiral.

Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

\*\*Letras minúsculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade.



**Figura 5.** Distribuição dos agregados estáveis em água por classe de tamanho no período chuvoso e seco na profundidade de 5-10 cm nas diferentes áreas no município de Pinheiral.

Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

\*\*Letras minúsculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade

**Tabela 5.** Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG) (mm) avaliado na estação chuvosa e seca.

| Áreas          | DMP      |          | DMG      |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
|                | Chuvosa  | Seca     | Chuvosa  | Seca     |
| <b>0-5 cm</b>  |          |          |          |          |
| FSEA           | 4,50 Ans | 4,69 Ans | 3,59 Bns | 4,26 Ans |
| FSEM           | 4,40 Ans | 4,82 Ans | 3,88 Bns | 4,53 Ans |
| FSEI           | 4,70 Ans | 4,72 Ans | 4,32 Ans | 4,47 Ans |
| PMM            | 4,91 Aa  | 4,70 Ab  | 4,92 Ans | 4,50 Ans |
| AP             | 3,77 Cb  | 4,69 Aa  | 2,71 Bb  | 4,38 Aa  |
| AA             | 4,23 Bb  | 4,60 Ba  | 3,27 Bb  | 3,80 Ba  |
| <b>5-10 cm</b> |          |          |          |          |
| FSEA           | 3,60 Bns | 3,63 Cns | 2,61 Bns | 2,48 Cns |
| FSEM           | 4,38 Ans | 4,34 Bns | 3,47 Ans | 3,60 Bns |
| FSEI           | 4,51 Ans | 4,78 Ans | 3,96 Ans | 4,34 Ans |
| PMM            | 4,40 Ans | 4,30 Bns | 4,40 Ab  | 3,61 Ba  |
| AP             | 3,63 Bb  | 4,33 Ba  | 2,55 Bb  | 3,59 Ba  |
| AA             | 4,32 Aa  | 3,63 Cb  | 3,64 Aa  | 2,61 Cb  |

\*Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade;  
\*\*Letras minúsculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade; ns-não significativo;  
\*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

Analisando a Tabela 7 e Tabela 8 observa-se correlação positiva entre o DMP e COT nas áreas de FSEA e PMM, mostrando que maiores teores de COT favorecem a estabilidade dos agregados. Nas outras áreas não foi observada correlação entre esses atributos e os teores de COT foram menores. Neves et al. (2006) avaliando efeito do manejo e da matéria orgânica sobre a estabilidade dos agregados em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico na região de Londrina-PR, também encontraram correlação positiva entre o teor de carbono total do solo e a estabilidade dos agregados, demonstrando que um maior teor de carbono orgânico, no solo, resulta numa melhor agregação. A matéria orgânica do solo, segundo Castro Filho et al. (1998) é um poderoso agente de formação e estabilização dos agregados, sendo comum verificar correlação positiva entre seus teores e a estabilidade dos agregados do solo.

**Tabela 6** Valores médios de carbono orgânico total (g kg<sup>-1</sup>) na estação chuvosa e seca

| Áreas* | Variáveis/Profundidade    |                       |                       |                       |                       |                       |                 |          |
|--------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|----------|
|        | COT (g kg <sup>-1</sup> ) |                       |                       |                       |                       |                       |                 |          |
|        | Chuvosa                   |                       | Seca                  |                       | Chuvosa               |                       | Seca            |          |
|        | <b>0-5 cm</b>             |                       | <b>5-10 cm</b>        |                       | <b>10-20 cm</b>       |                       | <b>20-40 cm</b> |          |
| FSEA   | 20,78 C <sup>ns</sup>     | 21,40 A <sup>ns</sup> | 9,12 Bb               | 18,40 Aa              | 11,55Ab               | 14,15 Aa              | 7,30 Ab         | 11,58 Aa |
| FSEM   | 34,89 Aa                  | 19,70 Bb              | 17,26 A <sup>ns</sup> | 14,38 B <sup>ns</sup> | 11,76 Ab              | 13,00 Aa              | 6,43 Bb         | 9,62 Ba  |
| FSEI   | 20,47 C <sup>ns</sup>     | 18,70 B <sup>ns</sup> | 14,16 A <sup>ns</sup> | 14,20 B <sup>ns</sup> | 11,81 A <sup>ns</sup> | 9,45 B <sup>ns</sup>  | 7,39 Ab         | 8,49 Ba  |
| PMM    | 22,55 B <sup>ns</sup>     | 23,35 A <sup>ns</sup> | 15,53 A <sup>ns</sup> | 14,57 B <sup>ns</sup> | 11,34 A <sup>ns</sup> | 10,99 B <sup>ns</sup> | 5,59 Bb         | 10,37 Aa |
| AP     | 9,82 D <sup>ns</sup>      | 12,22 C <sup>ns</sup> | 9,12 Bb               | 12,36 Ca              | 6,10 Bb               | 10,27 Ba              | 6,01 Bb         | 8,91 Ba  |
| AA     | 8,24 Db                   | 11,61 Ca              | 6,43 Bb               | 9,78 Da               | 5,81 Bb               | 9,18 Ba               | 5,31 Bb         | 8,94 Ba  |

\*Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade; \*\*Letras minusculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade; ns-não significativo;\*\*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

Menezes (2008) trabalhando nas mesmas áreas deste estudo, encontrou resultados semelhantes para o DMP nas áreas FSEI e FSEM na profundidade de 0-5 cm. Segundo o autor a recente conversão devido ao abandono da pastagem, anteriormente presente, com conseqüente desencadeamento do processo de sucessão florestal proporcionou uma contribuição no aporte de matéria orgânica oriunda da rizodeposição das gramíneas.

Nas áreas de floresta não houve diferença significativa do DMP e DMG entre a estação chuvosa e seca nas duas profundidades avaliadas. Segundo Herrick (2000) solos com cobertura mais elevada do dossel da floresta são capazes de resistir à degradação e processos erosivos, pois a cobertura funciona dissipando parte da energia das gotas de chuva incidentes na área. Além disso, promovem a entrada de matéria orgânica contribuindo para a resiliência da estrutura do solo após processo degradativo.

Na área de AP, os menores valores de DMP na profundidade de 0-5cm, pode ser devido à menor cobertura do solo associada a tratos culturais como capina manual ocasionando na exposição e ruptura dos agregados. A exposição do solo também acarreta em menores teores de COT, pois aumenta o ataque microbiano e a pressão parcial de oxigênio, acarretando em perdas de carbono orgânico pela oxidação da matéria orgânica (Canellas et al., 2003). Elliot (1986) acredita que a matéria orgânica associada aos agregados é rapidamente mineralizada dependendo do manejo adotado, como a aração e gradagem padrão observado por Carpenedo & Mielniczuk (1990) estudando a estabilidade estrutural dos agregados em condições de mata e campo nativo. Segundo Kasper et al., (2009) a diminuição da estabilidade dos agregados muitas vezes está relacionado ao uso do solo ou práticas de manejo adotadas.

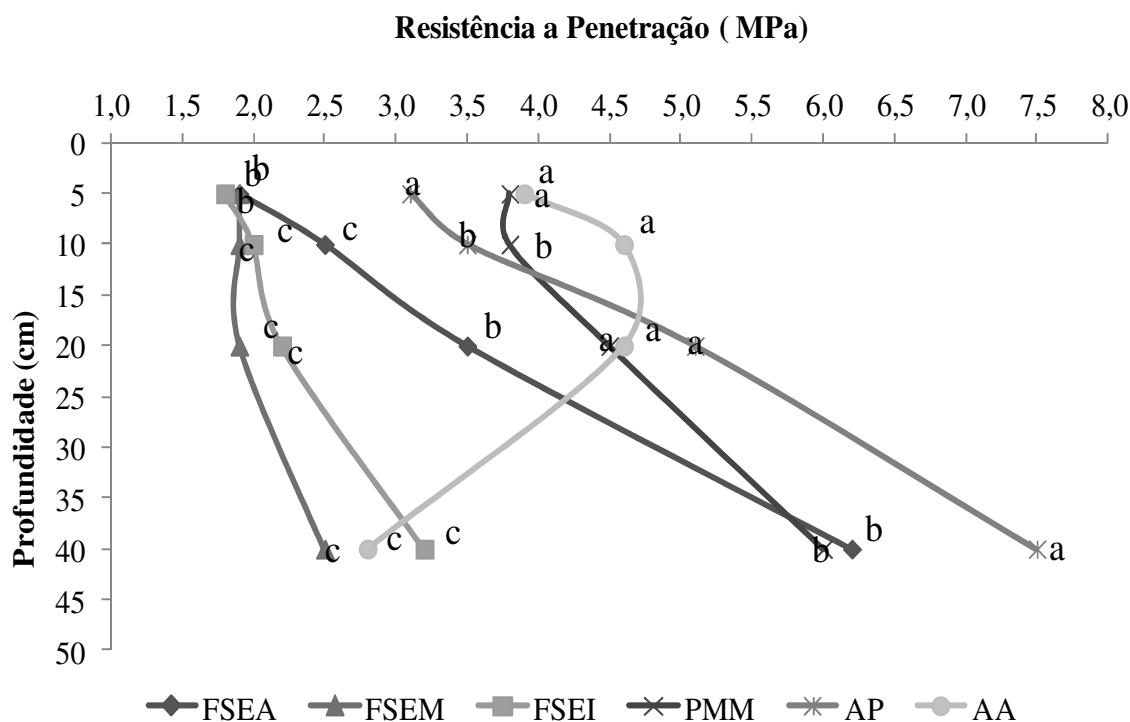
Diferente da área de AP, a área de AA apesar dos baixos teores de COT (Tabela 6), apresentou maiores valores de DMP nas duas profundidades, no período seco, isso se deve a presença de gramíneas como capim colônio (*Panicum Maximum*) que apresenta sistema radicular fasciculado e ocorre de maneira espontânea contribuindo para adição do carbono via renovação do sistema radicular e oferecendo uma maior proteção aos agregados da ação mecânica das gotas de chuva (Richard, et al., 2005). Esta gramínea se desenvolve principalmente no período chuvoso após o plantio da mandioca, pois não são feitos tratos culturais como roçada e capina manual. Segundo Calegari et al. (2006) diferentes práticas de manejo, que propiciem maior e melhor enraizamento das culturas, contribuirão para os processos de agregação do solo.

Em relação aos valores de DMG, na profundidade de 0-5 cm, verificaram-se diferentes variações entre as áreas quando comparado aos valores de DMP (Tabela 5). Os maiores valores de DMG foram observados nas áreas de PMM (4,92 mm) e FSEI (4,32 mm). As áreas FSEA e FSEM apresentaram os menores valores de DMG (3,59 mm e 3,88 mm respectivamente) (Tabela 5).

Na profundidade de 0-5 cm foram observados os menores valores de DMP e DMG na área de AP no período chuvoso e na profundidade de 5-10 cm, os menores valores de valores de DMP e DMG foram observados na área de FSEA (Tabela 5). Menezes (2008), trabalhando na mesma sub-bacia avaliando as áreas de FSEA, FSEM e FSEI, encontrou os menores valores destes atributos nas áreas de FSEA e AP, no período chuvoso. Os valores verificados na área de FSEA podem estar associados ao histórico de longos anos de cultivo de café (*Coffea arabica*) na área. Oliveira (2006), avaliando a agregação do solo em um LATOSSOLO AMARELO sob plantio de café durante 32 anos no município de Barra do Choça-BA, verificou que o DMP reduziu pela metade no horizonte Ap e cerca de um terço no BA quando comparado com a área de mata nativa .

#### 4.4 Georadar Associado ao Teste de Penetração

Os valores de resistência do solo a penetração (RSP) foram comparados aos resultados obtidos com o GPR. A área de FSEI apresentou aumento na RSP de 2,0 para 3,5 MPa, respectivamente para 20 cm e 40 cm de profundidade (Figura 7). Esse aumento pode ser resultante de adensamento devido à pressão das camadas superiores, da presença de raízes pivotantes ou ainda a variação de teor de argila em profundidade (Tabela 2), isto fica evidenciado na Tabela 8, onde se observa correlação positiva da resistência a penetração com a densidade do solo. Avaliando o radargrama da área FSEI (Figura 9) observa-se que o material de solo é em geral homogêneo, exceto pelo registro de algumas hipérboles de alta amplitude, caracterizando material distinto do substrato mineral do solo. As observações de campo indicam que essas hipérboles representam o sinal de reflexões das raízes no perfil de solo. No entanto, existem poucos estudos aplicando o GPR em análises de distribuição de raízes, portanto não é conhecido o contraste nas propriedades dielétricas entre a raiz e a matriz do solo circundante. Porém, partindo do fato de que as raízes têm alto conteúdo de água em relação ao solo, o contraste entre a raiz e a matriz do solo ao redor é feito a partir dessa diferença do conteúdo de água (Butnor et al., 2001).



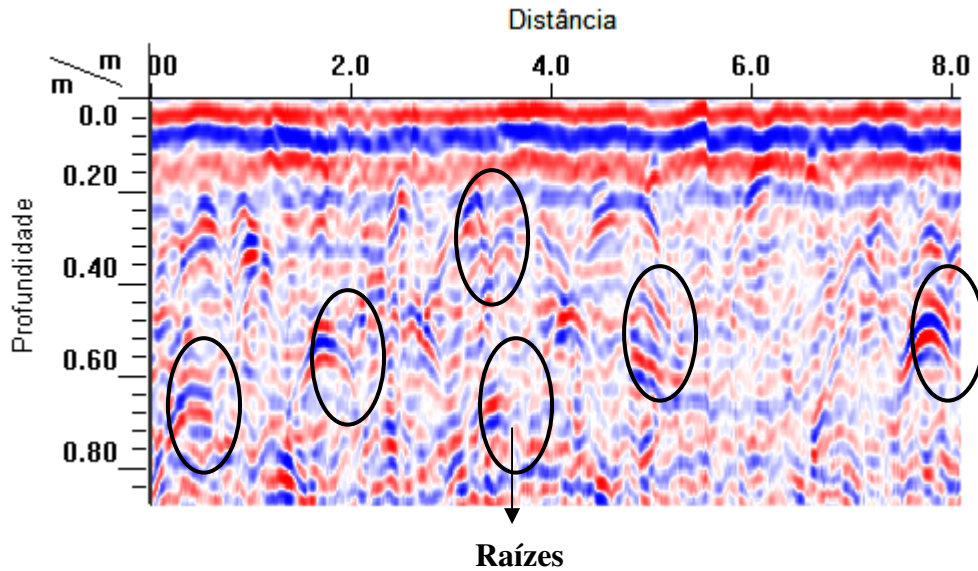
**Figura 6** Resistência à penetração nas diferentes profundidades nas áreas de estudo.

\*Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de S c o t t K n o t t, a 5% de probabilidade;

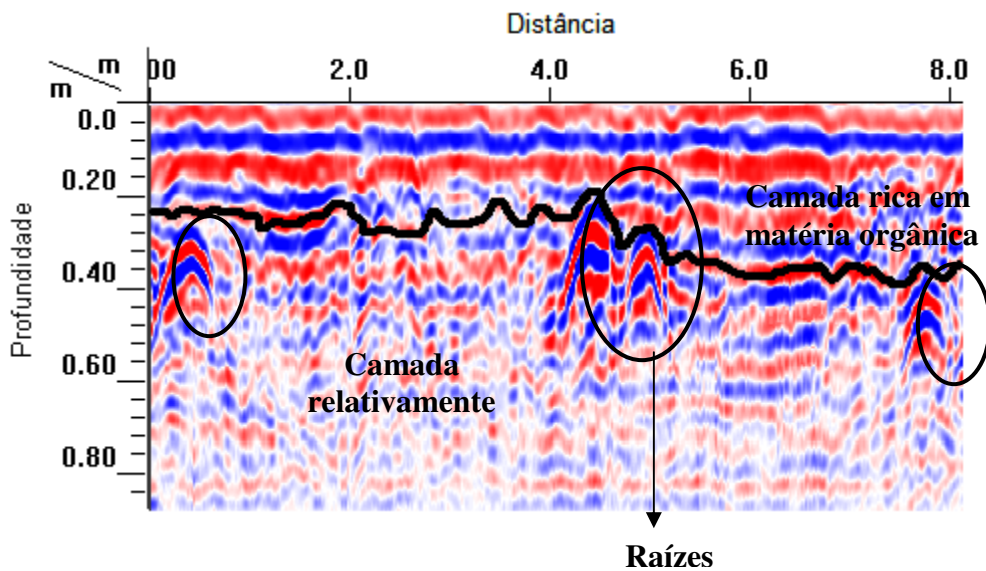
\*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

A área FSEM apresentou os menores valores de resistência do solo à penetração quando comparada com as outras áreas, variando de 2,0 a 2,5 MPa (Figura 7). Esse resultado pode ser explicado por variações na granulometria ou pelo maior teor de carbono orgânico total (COT) (Tabela 6), contribuindo para maior agregação e menor densidade do solo variando de  $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$  0-5 cm a  $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$  de 20-40 cm (Tabela 3), como observado no radargrama (Figura 8). Neste radargrama observa-se a presença de duas reflexões de alta e

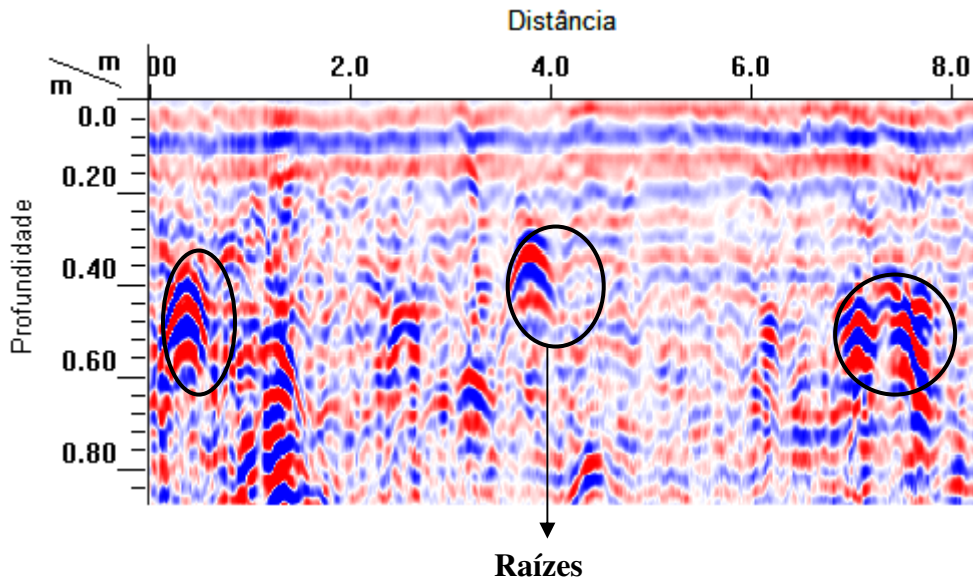
uma de baixa amplitude. As reflexões de alta amplitude correspondem a seções com mais matéria orgânica e a presença de raízes, logo maior conteúdo de água, que são registradas como hipérboles. Freeland et al. (2008), avaliando compactação do solo em gramados esportivos com GPR em Knoxville, Tennessee, observaram aumento na reflexão em áreas com maior teor de matéria orgânica. Na Figura 8 as reflexões de baixa amplitude indicam material de solo com pequena variação granulométrica e de composição relativamente homogênea.



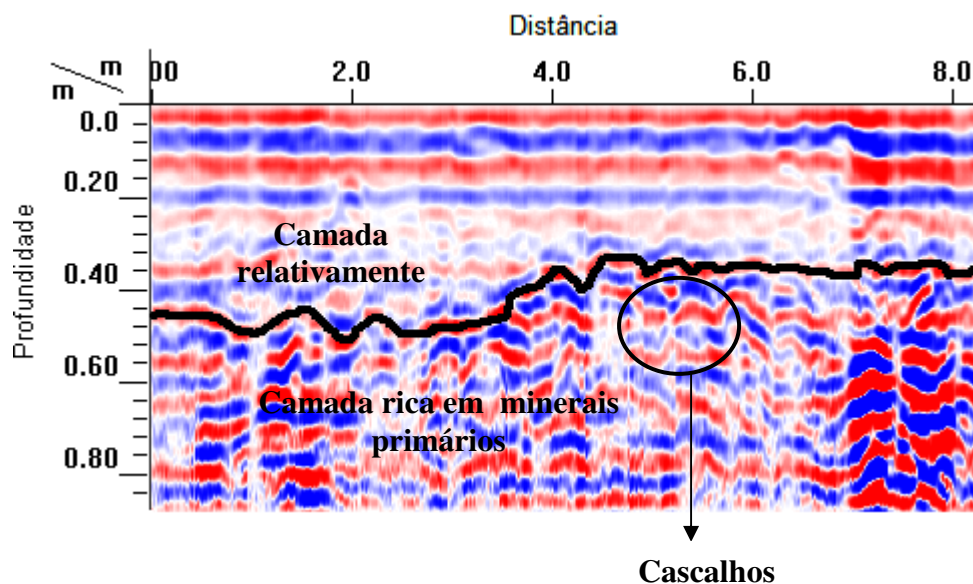
**Figura 7.** Transecto referente à área FSEA, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade  $0,09 \text{ m ns}^{-1}$ .



**Figura 8.** Transecto referente à área de FSEM, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade  $0,09 \text{ m ns}^{-1}$ .



**Figura 9.** Transecto referente à área FSEI, feito com antena de 900MHz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade  $0,09 \text{ m ns}^{-1}$ .

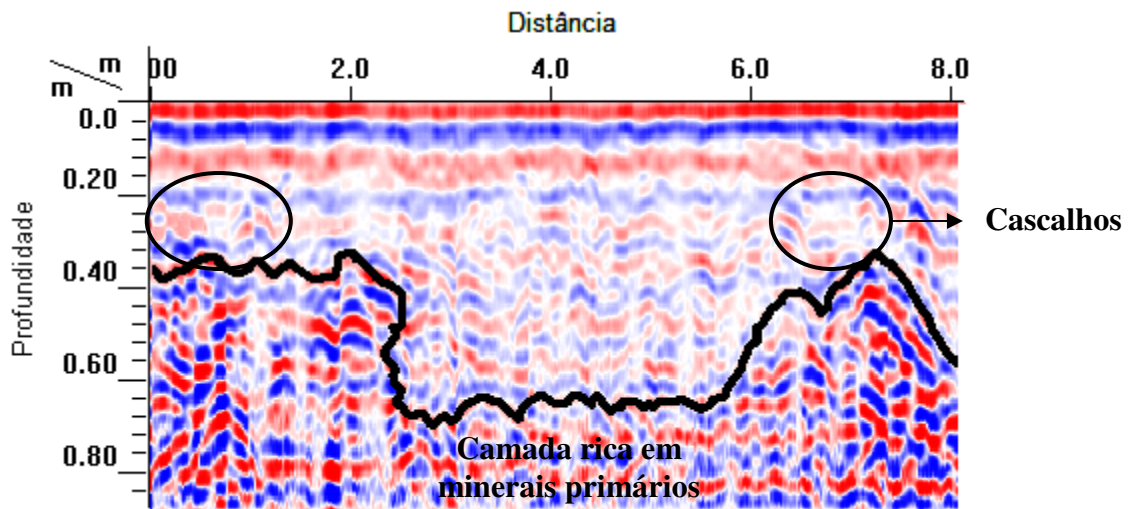


**Figura 10.** Transecto referente à área de PMM, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade  $0,11 \text{ m ns}^{-1}$ .

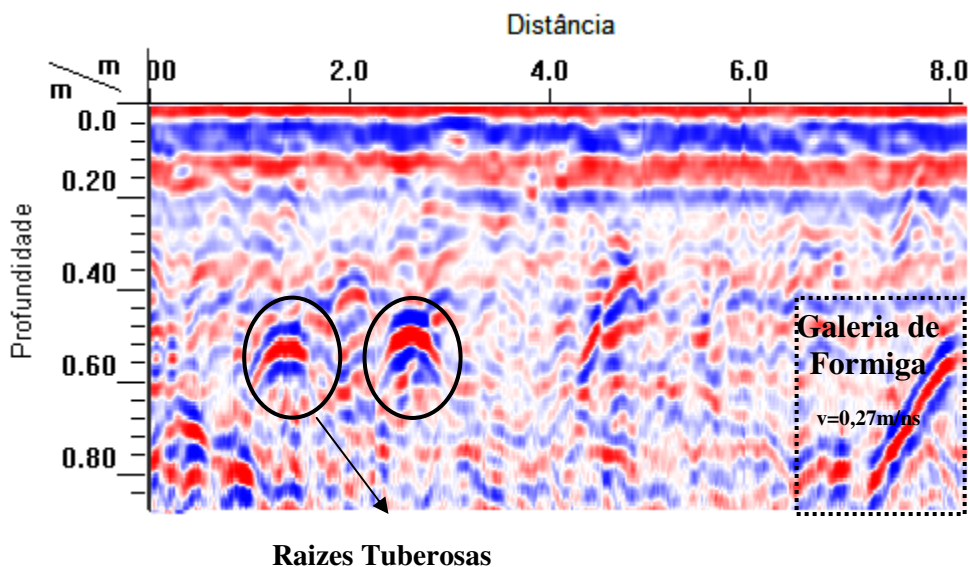
Já a área de FSEA apesar de apresentar valores intermediários de COT (Tabela 6) e médios de  $D_s$  a 0-20 cm de profundidade (Tabela 3) semelhante a das outras áreas de fragmento florestal, apresenta maior resistência do solo à penetração nas diferentes profundidades quando comparada com os outros fragmentos florestais. Tal fato pode ser atribuído ao maior teor de argila, em todas as profundidades (Tabela 2) bem como a maior ocorrência de raízes pivotantes. A RSP variou de 2,5 MPa na camada de 0-5 cm, para 3,5 e 6,0 MPa, aos 20 cm e 40 cm, respectivamente (Figura 7). Esse aumento é evidenciado no radargrama (Figura 7) pelo aumento dos refletores hiperbólicos, onde ocorre uma reflexão de alta amplitude atribuída à maior quantidade de raízes em FSEA. Já a reflexão de baixa amplitude, assim com em FSEM, indica a pequena variação entre as frações granulométricas. Em estudo aplicando o GPR para identificar profundidade do lençol freático em áreas com



vários usos em Seropédica-RJ, Medice (2007) observou aumento no número de refletores hiperbólicos, que foram atribuídos à interferência de raízes de árvores de grande porte.



**Figura 11.** Transecto referente à área de AP, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade  $0,11 \text{ m ns}^{-1}$ .



**Figura 12.** Transecto referente à área AA, feito com antena de 900mhz. Velocidade de conversão de tempo/ profundidade  $0,13 \text{ m ns}^{-1}$ .

Na área de PMM, a comparação entre a distribuição das frações granulométricas em profundidade (Tabela 2) e a resistência do solo à penetração (Figura 10) não mostrou o padrão esperado, de aumento da RSP com o aumento do teor de argila. Os valores de RSP, nas profundidades de 20 e 40 cm, foram de 4,5 e 6,0 MPa, respectivamente, inversamente a variação nos teores de argila. No entanto, foi observado aumento da Ds de  $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$  de 0-5cm para  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  de 20-40cm de profundidade, que apresentou correlação positiva com RSP (). O aumento da RSP em profundidade foi registrado no radargrama da área PMM (Figura 10) que indica a presença de duas camadas com propriedades eletromagnéticas distintas, com reflexões de baixa e alta amplitude, respectivamente, que se separam aproximadamente na profundidade de 40 cm.

As reflexões de baixa amplitude na camada superior, assim como nas áreas de fragmentos florestais, indicam características homogêneas do material de solo, com resposta eletromagnética similar. Os registros do GPR se baseiam em distinções claras entre materiais, assim, a reflexão de alta amplitude na Figura 10 foi atribuída à presença pontual de maior quantidade de materiais pouco alterados (fragmentos de rocha e minerais facilmente intemperizáveis a partir de 40 cm de profundidade).

A transição entre as camadas superior e inferior tem padrão ondulado, nas profundidades entre 32 e 48 cm, com a presença de cascalho representada por pequenas hipérboles ao longo do transecto (Figura 10). A fração cascalho constituiu-se principalmente de minerais primários mais resistentes ao intemperismo, destacando-se grãos de quartzo, observados no campo.

Apesar da grande quantidade de gramíneas na área de PMM não foi observado padrão devido à presença de raízes no radargrama. Segundo Bevan & Kenyon (1975) as raízes finas e superficiais não são identificadas pelo GPR devido ao baixo poder refletivo. Para identificar essas raízes é necessário outro método ou aprimoramento do GPR (Butnor et al., 2001).

Na área de AP verificou-se o aumento da resistência do solo a penetração de 3,5 para 5,0 e 7,0 MPa, nas profundidades de 10, 20 e 40 cm, respectivamente (Figura 11), com os maiores valores de RSP em profundidade entre todas as áreas e o aumento foi proporcional ao incremento no teor de argila (Tabela 2), e maior densidade do solo em todas as profundidades quando comparado com as área de fragmento floresta e PMM (Tabela 3) e menores valores de COT nas profundidades de 10-20 e 20-40 (Tabela 6), apresentando a mesma correlação positiva entre Ds com RSP, que as áreas de FSEI e PMM (Tabela 8).

Assim como na área de PMM foram observadas no radargrama (Figura 11) duas camadas distintas, porém com transição em profundidades diferentes (28 e 68 cm) e os cascalhos ocorrem na seção que se inicia a 20 cm. A imagem do radargrama confirma a variação na resistência à penetração do solo, pois aos 40 cm, observa-se o topo de uma camada com propriedades eletromagnéticas distintas da superior, que também oferece maior resistência ao penetrômetro pela presença de minerais primários e fragmentos de rocha alterados.

A área de AA apresenta incremento de argila subsuperficial (Tabela 2), porém a variação de resistência do solo à penetração (Figura 12) mostra maior valor de RSP na camada de 0 a 5 cm (4,5 MPa), com redução em profundidade chegando a 2,5 MPa aos 40 cm de profundidade. Embora fosse esperado que a resistência do solo a penetração na área de agricultura anual aumentasse, dado o preparo anual do solo, incremento do teor de argila em profundidade e valores de Ds,  $1,47 \text{Mg m}^{-3}$  a 0-5cm de profundidade (Tabela 3), foi verificado na superfície materiais de maior tamanho e resistência, como cascalhos de quartzo, similara ao observado na área de PMM, fator este que contribui para o o aumento da RSP.

Já em subsuperfície a presença de galerias de formigas diminui a resistência do solo a penetração. A análise do radargrama (Figura 12) confirma os resultados do teste de penetração, onde ao longo de todo o transecto o material é relativamente homogêneo na superfície, com reflexões de baixa amplitude. As reflexões de alta amplitude, que se apresentam como hipérboles e semi-hipérboles, caracterizam raízes tuberosas das plantas e galerias de formigas, respectivamente. Tais galerias foram diferenciadas das raízes pela variação da velocidade das hipérboles, onde as galerias apresentaram velocidade de aproximadamente  $0,13 \text{m ns}^{-1}$  e as raízes de  $0,28 \text{m ns}^{-1}$ , valor esse próximo à velocidade de propagação do sinal de GPR no ar ( $v=0,3 \text{m ns}^{-1}$ , Davis & Annan, 1989).

De uma forma geral, a antena de 900 MHz utilizada nas medições com o georadar foi adequada para registrar e identificar com alta resolução materiais como raízes, cascalhos, galerias de formigas, bem como variações entre as camadas de solo.

**Tabela 7** Coeficientes de correlação (Pearson) dos valores de DMP, DMG, COT, DS, MAC, MIC, C-HUM, C-FAH, RPS em solos de áreas de fragmento florestal estágio Avançado e Médio profundidade 0-5cm.

| Atributos   | DMP            | DMG            | COT             | DS             | MAC            | MIC             | CHUM            | CFAH            | CFAF    | RPS  |
|-------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|------|
| <b>FSEA</b> |                |                |                 |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| DMP         | 1,00           |                |                 |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| DMG         | 0,30ns         | 1,00           |                 |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| COT         | <b>0,76*</b>   | 0,05ns         | 1,00            |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| DS          | -0,59ns        | <b>-0,73**</b> | -0,23ns         | 1,00           |                |                 |                 |                 |         |      |
| MAC         | -0,23ns        | -0,21ns        | <b>-0,69*</b>   | 0,06ns         | 1,00           |                 |                 |                 |         |      |
| MIC         | <b>0,84***</b> | 0,06ns         | <b>0,91***</b>  | -0,15ns        | -0,54ns        | 1,00            |                 |                 |         |      |
| CHUM        | <b>0,81**</b>  | 0,26ns         | <b>0,97***</b>  | -0,44ns        | -0,70ns        | <b>0,86*</b>    | 1,00            |                 |         |      |
| CFAH        | <b>0,86**</b>  | 0,12ns         | <b>0,94***</b>  | -0,46ns        | -0,52ns        | <b>0,84**</b>   | <b>0,96***</b>  | 1,00            |         |      |
| CFAF        | -0,63ns        | 0,20ns         | -0,32ns         | 0,08ns         | -0,04ns        | -0,62ns         | -0,28           | -0,38ns         | 1,00    |      |
| RPS         | <b>-0,87**</b> | -0,14ns        | <b>-0,96***</b> | 0,42ns         | 0,59ns         | <b>-0,89***</b> | <b>-0,98***</b> | <b>-0,99***</b> | 0,41ns  | 1,00 |
| <b>FSEM</b> |                |                |                 |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| DMP         | 1,00           |                |                 |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| DMG         | <b>0,99***</b> | 1,00           |                 |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| COT         | -0,10ns        | -0,11ns        | 1,00            |                |                |                 |                 |                 |         |      |
| DS          | -0,47ns        | -0,41ns        | -0,38ns         | 1,00           |                |                 |                 |                 |         |      |
| MAC         | 0,17ns         | 0,19ns         | <b>0,84***</b>  | -0,32ns        | 1,00           |                 |                 |                 |         |      |
| MIC         | -0,21ns        | -0,27ns        | <b>0,70*</b>    | -0,63ns        | 0,33ns         | 1,00            |                 |                 |         |      |
| CHUM        | 0,22ns         | 0,22ns         | <b>0,91***</b>  | -0,50ns        | <b>0,96***</b> | 0,51ns          | 1,00            |                 |         |      |
| CFAH        | 0,26ns         | 0,26ns         | <b>0,87**</b>   | -0,51ns        | <b>0,97***</b> | 0,48ns          | <b>0,99***</b>  | 1,00            |         |      |
| CFAF        | 0,17ns         | 0,17ns         | <b>0,91***</b>  | -0,50ns        | <b>0,97***</b> | 0,53ns          | <b>0,99***</b>  | <b>0,99***</b>  | 1,00    |      |
| RPS         | <b>-0,81**</b> | <b>-0,77**</b> | -0,15ns         | <b>0,84***</b> | -0,33ns        | -0,16ns         | -0,44ns         | -0,46ns         | -0,41ns | 1,00 |

\*, \*\*, e \*\*\* são significativos à 5 %, 1 %, e 0,1 % respectivamente. ns= não significativo até 5; DMP= diâmetro médio ponderado; DMG= diâmetro médio geométrico; COT= carbono orgânico total; FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

**Tabela 8** Coeficientes de correlação (Pearson) dos valores de DMP, DMG, COT, DS, MAC, MIC, C-HUM, C-FAH, RPS em solos de áreas de fragmento florestal estágio Inicial, Pasto Manejado Misto na profundidade 0-5cm.

| Atributos   | DMP             | DMG             | COT             | DS              | MAC            | MIC            | CHUM           | CFAH           | CFAF    | RPS  |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|------|
| <b>FSEI</b> |                 |                 |                 |                 |                |                |                |                |         |      |
| DMP         | 1,00            |                 |                 |                 |                |                |                |                |         |      |
| DMG         | <b>0,99***</b>  | 1,00            |                 |                 |                |                |                |                |         |      |
| COT         | 0,28ns          | 0,28ns          | 1,00            |                 |                |                |                |                |         |      |
| DS          | -0,66ns         | -0,66ns         | -0,84ns         | 1,00            |                |                |                |                |         |      |
| MAC         | -0,12ns         | -0,14ns         | -0,87ns         | <b>0,79**</b>   | 1,00           |                |                |                |         |      |
| MIC         | 0,10ns          | 0,05ns          | 0,23ns          | -0,07ns         | -0,16ns        | 1,00           |                |                |         |      |
| CHUM        | 0,66ns          | 0,75ns          | 0,84*           | <b>-0,88**</b>  | 0,50ns         | -0,58ns        | 1,00           |                |         |      |
| CFAH        | <b>-0,93**</b>  | <b>-0,97***</b> | <b>-0,99***</b> | <b>0,99***</b>  | -0,05ns        | 0,15ns         | <b>-0,89**</b> | 1,00           |         |      |
| CFAF        | 0,86ns          | 0,84ns          | 0,68            | -0,83ns         | -0,46ns        | 0,56ns         | 0,53ns         | <b>0,99***</b> | 1,00    |      |
| RPS         | <b>-0,90***</b> | <b>-0,90***</b> | -0,47ns         | <b>0,77*</b>    | 0,44ns         | -0,09ns        | -0,49ns        | 0,38ns         | -0,50ns | 1,00 |
| <b>PMM</b>  |                 |                 |                 |                 |                |                |                |                |         |      |
| DMP         | 1,00            |                 |                 |                 |                |                |                |                |         |      |
| DMG         | <b>0,90***</b>  | 1,00            |                 |                 |                |                |                |                |         |      |
| COT         | <b>0,93***</b>  | <b>0,84***</b>  | 1,00            |                 |                |                |                |                |         |      |
| DS          | -0,65ns         | -0,66ns         | -0,84*          | 1,00            |                |                |                |                |         |      |
| MAC         | <b>0,91***</b>  | <b>0,79**</b>   | <b>0,93***</b>  | <b>-0,95***</b> | 1,00           |                |                |                |         |      |
| MIC         | 0,63ns          | 0,45ns          | 0,73*           | <b>-0,78**</b>  | <b>0,78**</b>  | 1,00           |                |                |         |      |
| CHUM        | <b>0,93***</b>  | <b>0,87**</b>   | <b>0,98***</b>  | <b>-0,98***</b> | <b>0,93***</b> | <b>0,80**</b>  | 1,00           |                |         |      |
| CFAH        | <b>0,90***</b>  | <b>0,88**</b>   | <b>0,97***</b>  | <b>-0,95***</b> | <b>0,86**</b>  | <b>0,71*</b>   | <b>0,98***</b> | 1,00           |         |      |
| CFAF        | <b>0,90***</b>  | <b>0,79**</b>   | <b>0,97***</b>  | <b>-0,97***</b> | <b>0,97***</b> | <b>0,82**</b>  | <b>0,98***</b> | <b>0,94***</b> | 1,00    |      |
| RPS         | -0,47ns         | -0,25ns         | -0,51ns         | 0,51ns          | -0,46ns        | <b>-0,84**</b> | -0,59ns        | -0,55ns        | -0,55ns | 1,00 |

\*, \*\*, e \*\*\* são significativos à 5 %, 1 %, e 0,1 % respectivamente. ns= não significativo até 5; DMP= diâmetro médio ponderado; DMG= diâmetro médio geométrico; COT= carbono orgânico total; FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

**Tabela 9** Coeficientes de correlação (Pearson) dos valores de DMP, DMG, COT, DS, MAC, MIC, C-HUM, C-FAH, RPS em solos de áreas de agricultura perene e anual na profundidade 0-5cm.

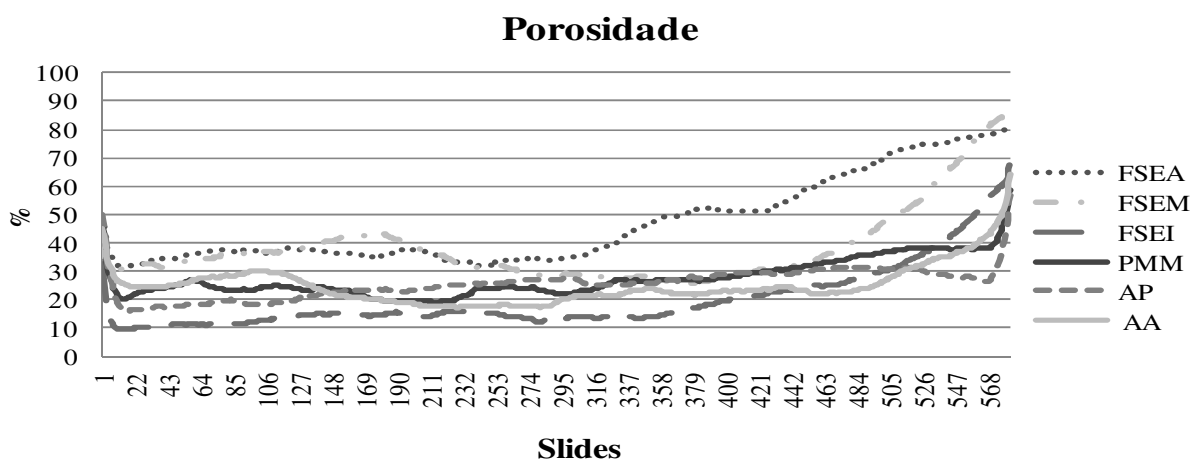
| Atributos | DMP            | DMG           | COT            | DS             | MAC            | MIC     | CHUM            | CFAH    | CFAF    | RPS  |
|-----------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------|-----------------|---------|---------|------|
| <b>AP</b> |                |               |                |                |                |         |                 |         |         |      |
| DMP       | 1,00           |               |                |                |                |         |                 |         |         |      |
| DMG       | <b>0,98***</b> | 1,00          |                |                |                |         |                 |         |         |      |
| COT       | -0,45ns        | -0,42ns       | 1,00           |                |                |         |                 |         |         |      |
| DS        | 0,08ns         | 0,08ns        | 0,02ns         | 1,00           |                |         |                 |         |         |      |
| MAC       | -0,48ns        | -0,55ns       | -0,18ns        | -0,25ns        | 1,00           |         |                 |         |         |      |
| MIC       | <b>0,71*</b>   | 0,64ns        | -0,27ns        | 0,56ns         | -0,61ns        | 1,00    |                 |         |         |      |
| CHUM      | 0,53ns         | 0,43ns        | -0,10ns        | -0,58ns        | 0,09ns         | 0,12ns  | 1,00            |         |         |      |
| CFAH      | 0,66ns         | <b>0,78**</b> | -0,41ns        | 0,14ns         | -0,37ns        | 0,23ns  | -0,01ns         | 1,00    |         |      |
| CFAF      | -0,51ns        | -0,40ns       | -0,04ns        | 0,55ns         | 0,04ns         | -0,19ns | <b>-0,97***</b> | 0,10ns  | 1,00    |      |
| RPS       | 0,23ns         | 0,16ns        | -0,00ns        | <b>0,89***</b> | -0,07ns        | 0,63ns  | -0,20ns         | 0,05ns  | 0,20ns  | 1,00 |
| <b>AA</b> |                |               |                |                |                |         |                 |         |         |      |
| DMP       | 1,00           |               |                |                |                |         |                 |         |         |      |
| DMG       | <b>0,97***</b> | 1,00          |                |                |                |         |                 |         |         |      |
| COT       | 0,09ns         | -0,07ns       | 1,00           |                |                |         |                 |         |         |      |
| DS        | -0,15ns        | -0,06ns       | -0,68ns        | 1,00           |                |         |                 |         |         |      |
| MAC       | -0,07          | 0,24ns        | <b>0,94***</b> | <b>-0,77*</b>  | 1,00           |         |                 |         |         |      |
| MIC       | -0,47ns        | -0,29ns       | -0,48ns        | 0,14ns         | -0,42ns        | 1,00    |                 |         |         |      |
| CHUM      | 0,19ns         | 0,33ns        | <b>-0,71*</b>  | <b>0,78**</b>  | <b>-0,90**</b> | 0,17ns  | 1,00            |         |         |      |
| CFAH      | -0,08ns        | -0,26ns       | <b>0,87**</b>  | -0,48ns        | <b>0,92***</b> | -0,52ns | <b>-0,82**</b>  | 1,00    |         |      |
| CFAF      | 0,25ns         | 0,25ns        | 0,41ns         | <b>-0,76**</b> | 0,49ns         | 0,21ns  | -0,66ns         | 0,33ns  | 1,00    |      |
| RPS       | -0,70*         | -0,69ns       | 0,06ns         | 0,22ns         | -0,01ns        | 0,22ns  | 0,19ns          | -0,06ns | -0,56ns | 1,00 |

\*, \*\*, e \*\*\* são significativos à 5 %, 1 %, e 0,1 % respectivamente. <sup>ns</sup>= não significativo até 5; DMP= diâmetro médio ponderado; DMG= diâmetro médio geométrico; COT= carbono orgânico total; FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

#### 4.5 Tomografia Computada (TC)

Nas áreas de FSEA e FSEI (Figura 13) é observada variação nos poros interagregados a partir do slide 313 e 253, respectivamente, onde se verifica diminuição na DS e aumento na porosidade na camada de 5-10 cm. O mesmo padrão foi verificado por meio da análise da densidade do solo e a macroporosidade, por meio de métodos convencionais, nas amostras coletadas na mesma época que para TC, período seco, sendo constatado aumento na macroporosidade e diminuição na densidade do solo na profundidade de 5-10 cm (Tabela 3 e Tabela 4). Uma possível explicação para esse padrão é o efeito da ação mecânica das raízes que favoreceu o acúmulo de material orgânico e, conseqüentemente, aumento da agregação e porosidade do solo, diminuindo dessa forma a Ds. Petrovic et al., (1982) demonstraram, por meio de técnicas de raios x, que as partículas minerais, agregados, densidade do solo e raízes são atributos que influenciam diretamente a macroporosidade.

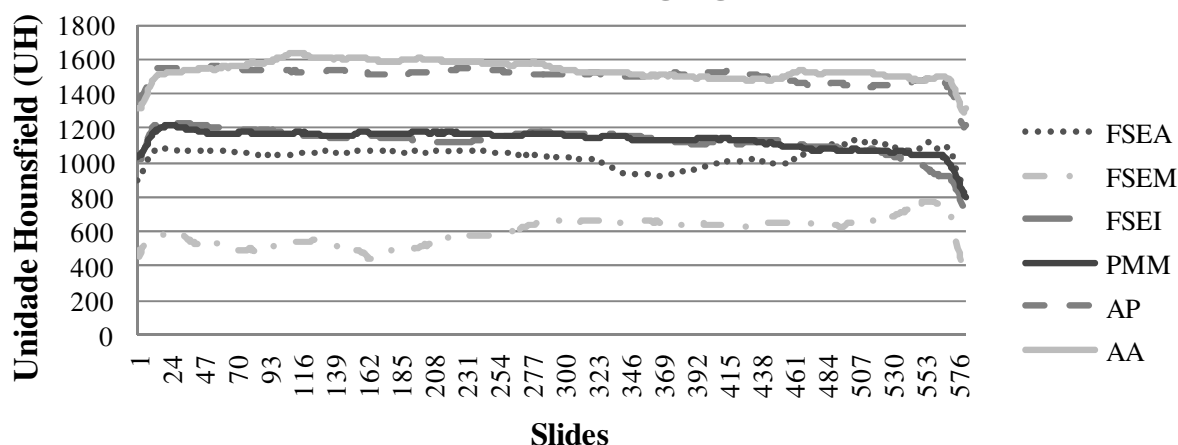
A DA, por meio das técnicas de TC, é avaliada por meio da quantidade de vazios intra-agregados, microporos e DMP. No caso das áreas de FSEA, FSEM, FSEI e PMM (Figura 14) não são observadas variações significativas na UH, que é o número usado para descrever a atenuação dos raios-X de cada voxel em uma imagem de modelo 3D. Na profundidade de 0-10 cm, o mesmo resultado foi observado por meio das análises de rotina, com valores de microporosidade semelhantes e sem diferenças significativas de DMP no período seco, para as mesmas profundidades (Tabela 4), demonstrando não haver variação na estabilidade dos agregados nas profundidades avaliadas. Estes resultados foram abordado anteriormente, atribuindo-se como razão do padrão observado o aporte de serrapilheira presente nestas áreas, que contribui para os aumentos dos teores de COT e contribuindo para a manutenção da estabilidade dos agregados até a profundidade 5-10 cm. Segundo Chung et al. (2008) a adição de COT proporciona maior DMP e melhor estabilidade dos agregados.



**Figura 13.** Porosidade referente à área de FSEA, FSEM, FSEI, PMM, AP, AA obtidas por meio da análise de tomografia computada de raios-X.

Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

## Densidade dos Agregados



**Figura 14** Densidade dos Agregados referente às áreas de FSEA, FSEM, FSEI, PMM, AP, AA obtidas por meio da análise de tomografia computada de raios-X.

Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

Já na área de FSEM é observada característica hiperbólica a partir do slide 177, com aumento na DS e diminuição na porosidade e no slide 369 com diminuição na DS e aumento da porosidade (Figura 13). Essa peculiaridade também foi observada através da diminuição da Ds e aumento da macroporosidade na profundidade 0-5 para 5-10 cm, e posterior diminuição da Ds e aumento da macroporosidade na profundidade de 10-20 cm. Os resultados encontrados, como discutidos anteriormente, podem ser devidos ao histórico de cultivos agrícolas realizados na área antes do processo de recuperação da floresta.

A área de pasto (Figura 13) apresenta pequena variação na DS e porosidade, como constatado na densidade do solo nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm com valores de 1,06 Mg m<sup>-3</sup> e 1,08 Mg m<sup>-3</sup>, e macroporosidade 1,6 m<sup>3</sup>m<sup>3</sup> e 1,5 m<sup>3</sup>m<sup>3</sup> respectivamente. Assim como o resultado do teste de resistência a penetração, que não apresentou variação na profundidade de 0-10cm, os resultados obtidos, como já mencionado, foram decorrentes da ação mecânica e deposição de COT das raízes das gramíneas presentes neste área, que melhoram a agregação do solo e conferem características semelhantes de DS e macroporosidade nas profundidades de 0-5 e 5-10cm. Pachepsky et al. (1996) relataram que as práticas de manejo afetam a porosidade e densidade do solo, atribuindo o maior número de macroporos ao maior desenvolvimento das raízes em função da adição de matéria orgânica. Estudos feitos com TC por Rachman et al., (2005) em Iowa e Missouri no EUA, demonstram gramíneas melhoram a porosidade e a macroporosidade do solo.

Já na área de AP (Figura 13) observa-se pequena diminuição gradual na DS e pequeno aumento da porosidade variando em 200UH, esses resultados também foram observados na análise de DS e macroporosidade nas análises de rotina. Mesmo esta área não sendo submetida a perturbações anuais, como nas práticas em agricultura anual, é demonstrada maior densidade do solo, pelo TC, em superfície que diminui em profundidade. Práticas de manejo do solo inadequadas resultam no encrostamento superficial aumentando a DS nesta região, tornando as características físicas do solo prejudiciais ao crescimento das culturas e infiltração de água (Fox et al., 2004).

Apesar dos resultados apresentados na área de AP, estudos têm demonstrado ligações claras do aumento da densidade e resistência do solo, em resposta as más práticas de manejo (Atkinson et al., 2009) como é observado na área de AA (Figura 13), com aumento da DS e diminuição da porosidade a partir do slide 113. Os menores valores de DS observados do

slide 0-109, provavelmente se devem a práticas de capina manual feitas nesta área durante o período das chuvas. Estes resultados estão em conformidade com os observados por Hill & Cruse (1985), que constataram aumento na macroporosidade e diminuição na Ds com o revolvimento do solo em superfície.

Os resultados de DA tanto na área de AP quanto na AA (Figura 14) sem variações na escala UH em toda amostra, corroboram com os resultados de microporosidade e DMP que não apresentaram variações significativas na mesma área (Tabela 4 Tabela 5), demonstrando que as maiores variações em profundidade na estrutura do solo, ocasionada pelo manejo, ocorrem interagregado e não intra-agregados. Segundo Araújo, (2004) a porosidade pode ser um bom parâmetro para indicar alterações no solo causadas pelo uso, pois ela pode refletir sua qualidade uma vez que a mesma tem implicação direta na velocidade de infiltração da água, trocas gasosas, vida microbiana e crescimento das raízes finas e as mudanças negativas ocorrem principalmente em função práticas inadequadas de manejo.

#### **4.6 Atributos Químicos do Solo**

Na Tabela 10 são apresentados os atributos químicos das diferentes áreas de estudo. Verifica-se que os menores valores de pH foram encontrados na profundidade de 0-5 cm na FSEA, tanto na estação chuvosa quanto seca e as outras áreas apresentaram valores semelhantes com pequenas variações entre as duas estações. Segundo Menezes (2008) os maiores valores de pH na primeira camada nas áreas FSEM e FSEI, podem ser atribuídos à ciclagem de nutrientes que ocorre em maior intensidade nesta formação vegetal, havendo menor imobilização destes na biomassa vegetal, o que diferenciaria estas formações florestais da área FSEA, já nas áreas de PMM, AP e AA os valores encontrados são influenciados pelo histórico de calagem.

Os valores de pH encontrados nas outras profundidades são concordantes com os observados por Barreto et al. (2006), que estudando as características físicas e químicas de solos sob floresta, plantio de cacau e pastagem, no sul da Bahia, também encontraram valores de pH estatisticamente diferentes entre os três usos do solo na profundidade de 0-10 cm, com valores de 4,50; 5,01 e 5,65 para floresta, cacau e pastagem, respectivamente. De acordo com o autor, os solos sob floresta geralmente apresentam menores valores de pH, uma vez que a mineralização da matéria orgânica e os exsudatos ácidos liberados pelas raízes das plantas contribuem para acidificar o solo.

Os teores de Ca, Mg e Al não apresentaram variação entre as áreas de FSEA e FSEI, enquanto nas áreas de FSEM e PMM verificam-se os menores valores de Al e maiores de Ca e Mg, não sendo observada diferença significativa entre as duas estações avaliadas. Menezes (2008), trabalhando na mesma sub-bacia, em 2008, observou padrão similar ao desse estudo para as áreas de FSEA, FSEM, FSEI e PMM, atribuindo o resultado em áreas FSEM a baixa taxa de decomposição da serapilheira e valores mais elevados de COT (Tabela 6), em FSEI ao uso anterior da área sem o uso de corretivos como calagem e adubação. Os resultados na área de FSEA podem ser atribuídos à imobilização de bases nas espécies de maior porte que predominam neste sistema, principalmente nos seus compartimentos de maior biomassa vegetal como troncos, e em menor quantidade como serapilheira, esse padrão também foi observado por Silva (1998) em áreas de roça caiçara avaliando a dinâmica de nutrientes, propriedades físicas e fauna do solo.



**Tabela 10.** Valores de pH, Ca, Mg, Al<sup>3+</sup> e H+Al nas diferentes profundidades.

| Prof<br>(cm)                                   | Áreas de Estudo |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|  | FSEA            |         | FSEM    |         | FSEI    |         | PMM     |         | AP      |         | AA      |         |
|  | Verão           | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno |
| <b>pH</b>                                      |                 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                     | 4,1 Cns         | 3,9 Cns | 5,9 Ans | 5,6 Ans | 5,8 Aa  | 4,8 Bb  | 5,2 Bns | 5,6 Ans | 5,4 Bb  | 5,7 Aa  | 5,5 Bns | 5,8 Ans |
| <b>5-10</b>                                    | 4,1 Cns         | 3,8 Ens | 4,7 Bns | 4,7 Dns | 4,4 Cns | 4,5 Dns | 5,0 Ans | 5,1 Cns | 5,2 Ans | 5,4 Bns | 5,5 Ans | 5,7 Ans |
| <b>10-20</b>                                   | 4,1 Ba          | 3,8 Db  | 4,3 Bns | 4,5 Cns | 4,5 Bns | 4,5 Cns | 5,2 Ab  | 6,0 Aa  | 5,1 Ans | 5,3 Bns | 5,5 Ans | 5,5 Bns |
| <b>20-40</b>                                   | 4,1 Dns         | 3,9 Cns | 4,3 Cns | 4,4 Bns | 4,2 Da  | 4,4 Bb  | 5,1 Bns | 5,2 Ans | 5,1 Bns | 5,1 Ans | 5,5 Ans | 5,4 Ans |
| <b>Ca (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>   |                 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                     | 2,3 Bns         | 2,2 Bns | 5,3 Ans | 4,9 Ans | 1,5 Bns | 1,6 Bns | 3,1 Bns | 5,0 Ans | 2,3 Bns | 2,2 Bns | 1,8Bns  | 2,4 Bns |
| <b>5-10</b>                                    | 1,1 Cns         | 1,3 Bns | 2,1 Bns | 2,7 Ans | 0,6 Cns | 0,5 Cns | 2,6 Ans | 2,0 Ans | 2,1 Bns | 1,8 Ans | 2,0 Bns | 2,3 Ans |
| <b>10-20</b>                                   | 0,8 Bns         | 1,3 Ans | 1,2 Ans | 1,5 Ans | 0,5 Bns | 0,3 Bns | 1,5 Ans | 1,2 Ans | 1,6 Ans | 1,6 Ans | 1,6 Ans | 1,5 Ans |
| <b>20-40</b>                                   | 0,7 Cns         | 1,1 Ans | 0,6 Cns | 0,9 Ans | 0,4 Cns | 0,3 Bns | 0,8 Cns | 1,4 Ans | 1,8 Ans | 1,5 Ans | 1,2 Bns | 1,5 Ans |
| <b>Mg (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>   |                 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                     | 3,4 Ca          | 1,5 Db  | 8,7 Aa  | 5,0 Ab  | 6,8 Ba  | 1,4 Db  | 3,8 Cns | 4,9 Ans | 4,7 Ca  | 2,7 Cb  | 5,2 Ca  | 3,6 Bb  |
| <b>5-10</b>                                    | 2,4 Ca          | 1,4 Cb  | 3,6 Bns | 3,0 Bns | 1,9 Ca  | 1,3 Cb  | 4,0 Bb  | 5,3 Aa  | 4,4 Ba  | 2,6 Bb  | 5,8 Aa  | 2,6 Bb  |
| <b>10-20</b>                                   | 1,8 Dns         | 1,7 Bns | 2,4 Cns | 1,7 Bns | 1,1 Da  | 0,6 Cb  | 3,0 Ca  | 1,9 Bb  | 3,8 Ba  | 1,9 Bb  | 5,5 Aa  | 3,0 Ab  |
| <b>20-40</b>                                   | 1,7 Cns         | 1,1 Cns | 1,5 Cns | 1,7 Bns | 1,4 Cns | 0,7 Cns | 2,9 Bns | 1,5 Bns | 3,6 Bns | 2,7 Ans | 5,1 Aa  | 2,6 Ab  |
| <b>Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>   |                 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                     | 1,1 Aa          | 0,4 Ab  | 0,0 Cns | 0,1 Cns | 0,6 Ba  | 0,0 Cb  | 0,1 Cns | 0,0 Cns | 0,1 Cns | 0,2 Bns | 0,2 Cns | 0,2 Bns |
| <b>5-10</b>                                    | 1,4 Aa          | 0,8 Ab  | 0,8 Bns | 0,4 Ans | 1,7 Aa  | 0,0 Bb  | 0,1 Cns | 0,0 Bns | 0,2 Cns | 0,6 Ans | 0,1 Cb  | 0,6 Aa  |
| <b>10-20</b>                                   | 1,9 Aa          | 0,8 Ab  | 1,5 Ans | 0,8 Ans | 1,8 Aa  | 0,0 Cb  | 0,4 Ba  | 0,0 Cb  | 0,3 Bns | 0,5 Bns | 0,1 Bb  | 0,6 Ba  |
| <b>20-40</b>                                   | 2,0 Aa          | 0,7 Ab  | 1,9 Aa  | 0,9 Ab  | 1,8 Aa  | 0,1 Db  | 0,5 Bns | 0,1 Dns | 0,6 Bns | 0,3 Cns | 0,1 Bns | 0,5 Bns |
| <b>H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b> |                 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                     | 7,0 Ans         | 8,9 Bns | 5,8 Bb  | 7,4 Ca  | 7,2 Ab  | 10,3 Aa | 6,0 Bns | 5,5 Dns | 4,5 Cns | 6,1 Dns | 4,5 Ca  | 4,3 Eb  |
| <b>5-10</b>                                    | 6,5 Bns         | 7,9 Ans | 6,5 Bns | 7,3 Ans | 7,2 Ab  | 7,9 Aa  | 5,4 Cns | 5,5 Bns | 5,0 Cns | 5,4 Bns | 4,5 Db  | 5,4 Ba  |
| <b>10-20</b>                                   | 6,2 Bns         | 6,6 Bns | 6,8 Aa  | 6,0 Bb  | 6,9 Ans | 7,4 Ans | 5,4 Ca  | 4,6 Cb  | 4,9 Dns | 5,2 Cns | 4,5 Dns | 4,6 Cns |
| <b>20-40</b>                                   | 5,7 Bns         | 5,8 Bns | 6,5 Ans | 7,2 Ans | 6,3 Ab  | 7,6 Aa  | 5,1 Ca  | 3,9 Db  | 4,8 Cns | 4,4 Dns | 4,4 Db  | 5,1 Ca  |

\*Letras maiúsculas diferentes na linha indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade; \*\*Letras minúsculas na linha indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade; ns-não significativo; \*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

**Tabela 11.** Valores de potássio (K), sódio (Na<sup>+</sup>) e fósforo (P) nas diferentes profundidades.

| Prof<br>(cm)                                 | Áreas de Estudo |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--|-----------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|  | FSEA            |          | FSEM    |         | FSEI    |         | PMM     |         | AP      |         | AA      |         |
|  | Verão           | Inverno  | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno | Verão   | Inverno |
| <b>K (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>  |                 |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                   | 0,2 Cns         | 0,16 Bns | 0,6 Aa  | 0,31 Ab | 0,4 Ba  | 0,09 Db | 0,6 Aa  | 0,07 Db | 0,2 Ca  | 0,07 Db | 0,3 Ca  | 0,19 Cb |
| <b>5-10</b>                                  | 0,2 Cns         | 0,14 Bns | 0,4 Ba  | 0,19 Ab | 0,2 Ca  | 0,07 Cb | 0,6 Aa  | 0,04 Cb | 0,1 Ca  | 0,04 Cb | 0,1 Ca  | 0,05 Cb |
| <b>10-20</b>                                 | 0,1 Cns         | 0,09 Bns | 0,2 Ba  | 0,12 Ab | 0,1 Ca  | 0,03 Cb | 0,5 Aa  | 0,03 Cb | 0,1 Ca  | 0,03 Cb | 0,1 Ca  | 0,04 Cb |
| <b>20-40</b>                                 | 0,1 Cns         | 0,07 Ans | 0,2 Ba  | 0,07 Ab | 0,1 Ca  | 0,02 Bb | 0,5 Aa  | 0,02 Bb | 0,1 Ca  | 0,03 Bb | 0,1 Ca  | 0,03 Bb |
| <b>Na (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b> |                 |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                   | 0,03 Ans        | 0,02 Cns | 0,05 Aa | 0,03 Bb | 0,05 Aa | 0,01 Eb | 0,05 Aa | 0,03 Ab | 0,06 Aa | 0,01 Db | 0,06 Aa | 0,01 Db |
| <b>5-10</b>                                  | 0,03 Cns        | 0,02 Cns | 0,05 Ba | 0,02 Bb | 0,04 Ca | 0,00 Eb | 0,04 Ca | 0,03 Ab | 0,07 Aa | 0,01 Db | 0,07 Aa | 0,01 Db |
| <b>10-20</b>                                 | 0,03 Cns        | 0,01 Cns | 0,03 Ca | 0,02 Bb | 0,04 Ca | 0,00 Db | 0,05 Ca | 0,03 Ab | 0,08 Aa | 0,00 Db | 0,06 Ba | 0,00 Db |
| <b>20-40</b>                                 | 0,03 Bns        | 0,02 Bns | 0,04 Ba | 0,02 Bb | 0,04 Ba | 0,01 Cb | 0,05 Ba | 0,03 Ab | 0,07 Aa | 0,03 Ab | 0,06 Aa | 0,01 Cb |
| <b>P (mg dm<sup>-3</sup>)</b>                |                 |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>0-5</b>                                   | 4 Aa            | 2 Bb     | 3 Ca    | 2 Bb    | 4 Ba    | 2 Bb    | 4 Aa    | 3 Ab    | 2 Db    | 3 Aa    | 2 Dns   | 2 Bns   |
| <b>5-10</b>                                  | 1 Ans           | 2 Ans    | 1 Ans   | 2 Ans   | 1 Ans   | 2 Ans   | 1 Ans   | 2 Ans   | 1 Ans   | 2 Ans   | 1 Bns   | 0 Bns   |
| <b>10-20</b>                                 | 1 Bns           | 1 Ans    | 1 Cns   | 1 Ans   | 1 Cns   | 0 Bns   | 2 Ans   | 1 Ans   | 1 Da    | 0 Bb    | 1 Dns   | 0 Bns   |
| <b>20-40</b>                                 | 1 Cns           | 1 Ans    | 1 Cns   | 0 Bns   | 1 Cns   | 0 Bns   | 1 Cns   | 1 Ans   | 1 Cns   | 0 Bns   | 2 Aa    | 0 Bb    |

\*Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as áreas pelo teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade; \*\*Letras minúsculas indicam diferença estatística entre as estações pelo teste F, a 5% de probabilidade; ns-não significativo; \*\*Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual;

Para a área de PMM os resultados também podem ser justificados pela constante renovação do sistema radicular das gramíneas que atuam na ciclagem de bases e na complexação do alumínio trocável por meio da matéria orgânica (Miyazawa et al., 1992; Giongo et al., 1997). As áreas de AP e AA foram as que apresentaram menores valores de Al que aumentaram da estação chuvosa para seca, principalmente nas camadas 5-10 e 10-20 cm e maiores de Ca e Mg, porém intermediários quando comparados com as outras áreas. Esses resultados podem estar relacionados ao uso contínuo das áreas para agricultura de subsistência de baixa tecnologia. O uso intensivo de áreas com agricultura familiar de subsistência, normalmente está associada à degradação do ambiente, esta degradação é representada pela perda de biodiversidade, redução da fertilidade do solo e pela intensificação dos processos erosivos em relação às condições encontradas sob vegetação original (Silva, 2000; Fraga & Salcedo, 2004).

Quanto à acidez potencial (H+Al), em todas as profundidades avaliadas, os maiores valores foram encontrados para as áreas FSEA e FSEI, valores intermediários para FSEM e PMM e menores valores para as áreas AP e AA. Provavelmente os valores encontrados nas áreas de PMM, AP e AA são devidos calagem feita nestas áreas antes da implantação das culturas. Já na área FSEI podem ser explicadas por seu prolongado uso com agricultura em pequena escala e de subsistência, que antecedeu ao início do processo de sucessão florestal, com baixo nível tecnológico de manejo do solo, sem emprego de calagem e adubação, e pela retirada de bases do sistema via colheita de produtos. Somado a isto, a exposição do solo ao processo erosivo durante período prolongado de cultivo, por certo contribuiu para perda de bases por escoamento superficial. Supõe-se que tais perdas nesta área não puderam até o presente serem compensadas pelos aportes de matéria orgânica deste estágio inicial de sucessão florestal, mesmo com a presença de gramíneas remanescentes de pastagens ali anteriormente.

Os valores de fósforo assimilável nas diferentes camadas nas seis áreas (Tabela 10) estão dentro da classe muito baixa (até  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Almeida et al., 1988), o que é comum em solos de regiões tropicais e coerente com a prática de adubação fosfatada pouco utilizada na região de estudo (Menezes, 2008). Em se tratando das áreas de floresta, Feitosa (2004) também verificou baixos valores de pH, elevada acidez potencial e elevados teores de alumínio trocável na área florestal em estudo realizado em um fragmento florestal de Mata Atlântica, em Pernambuco. A acidez do solo em áreas de floresta pode estar relacionada à liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição da serapilheira (Mafra et al., 2008).

Os maiores valores de K foram encontrados até 20 cm de profundidade na área de PMM, e podem ser explicados pela maior adição de carbono orgânico, da contribuição das raízes finas de gramíneas, que apresentam renovação rápida e constante (Mello et al., 1989). Os valores observados na FSEM também podem ser atribuídos à adição de carbono contribuindo positivamente com a ciclagem e nutrientes e a complexação do alumínio.

#### **4.7 Substâncias Húmicas e Carbono Orgânico Total (COT)**

Os valores médios das substâncias húmicas, humina (C-HUM), ácido fúlvico (C-FAH) e ácido humico (C-FAH) encontram-se na Tabela 12 e o COT na Tabela 6. Os maiores teores de COT foram encontrados nas áreas de PMM, FSEA e FSEM na camada de 0-5 cm. Segundo Toledo et al. (2002) a intensa ciclagem do sistema radicular das gramíneas na área de PMM e a influência do acúmulo de serapilheira nas áreas de floresta, contribuem para o aumento de COT, principalmente na camada superficial (Barreto et al., 2006). As áreas de AP e AA apresentaram os menores valores de COT, explicados pelo maior revolvimento do solo, contribuindo para uma maior oxidação do carbono do solo (Matsuoka et al., 2003; Menezes, 2008).

Quanto às substâncias húmicas, os maiores valores de carbono foram encontrados para a C-HUM, em todas as áreas de estudo, sendo observado decréscimo em profundidade. O fato da C-HUM apresentar-se em maior proporção pode ser atribuído a menor estabilidade (movimentação no perfil, mineralização) das frações alcalino-solúveis (C-FAH e C-FAF). Maiores teores de C-HUM são característicos de solos de baixa fertilidade e textura arenosa, onde grande parte do COT é convertido nessa fração (Loss et al., 2004), Araújo et al. (2004), comparando áreas de pupunha e áreas de pastagem, relataram que havia possibilidade dos ácidos orgânicos se movimentarem no solo em profundidade. Outros fatores que podem estar favorecendo esse resultado são a insolubilidade e a resistência à biodegradação da humina, que por estar associada à fração mineral do solo, promove maior permanência da mesma no solo (Canellas et al., 2000).

**Tabela 12.** Valores médios das substâncias húmicas, C-FAH, C-FAF e C-HUM, e carbono orgânico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas áreas sob diferentes coberturas vegetais nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm

| Áreas        | Substâncias Húmicas ( $\text{g kg}^{-1}$ ) |        |        |        |
|--------------|--|--------|--------|--------|
|              | Profundidade (cm)                          |        |        |        |
|              | 0-5  | 5-10   | 10-20  | 20-40  |
| <b>C-HUM</b> |  |        |        |        |
| <b>FSEA</b>  | 14,05 A                                    | 9,83 A | 6,63 B | 5,24 C |
| <b>FSEM</b>  | 12,32 B                                    | 7,85 B | 8,14 A | 5,35 C |
| <b>FSEI</b>  | 12,72 B                                    | 9,92 A | 5,00 C | 5,26 C |
| <b>PMM</b>   | 12,49 B                                    | 9,94 A | 7,51 A | 5,73 B |
| <b>AP</b>    | 8,28 C                                     | 7,92 B | 5,51 C | 5,07 C |
| <b>AA</b>    | 6,68 D                                     | 7,41 C | 6,44 B | 6,63 A |
| <b>C-FAH</b> |  |        |        |        |
| <b>FSEA</b>  | 2,70 B                                     | 1,23 D | 0,53 D | 0,49 C |
| <b>FSEM</b>  | 2,37 C                                     | 1,42 C | 1,20 B | 0,49 C |
| <b>FSEI</b>  | 1,07 E                                     | 1,68 B | 0,49 D | 0,56 C |
| <b>PMM</b>   | 2,83 A                                     | 2,09 A | 1,35 A | 1,05 A |
| <b>AP</b>    | 1,67 D                                     | 1,68 B | 0,96 C | 0,73 B |
| <b>AA</b>    | 0,99 E                                     | 0,50 E | 0,67 D | 0,52 C |
| <b>C-FAF</b> |  |        |        |        |
| <b>FSEA</b>  | 3,43 B                                     | 3,63 A | 2,49 B | 3,38 A |
| <b>FSEM</b>  | 2,97 C                                     | 2,32 D | 2,52 B | 2,23 B |
| <b>FSEI</b>  | 4,17 A                                     | 3,08 B | 2,79 A | 2,30 B |
| <b>PMM</b>   | 3,54 B                                     | 3,17 B | 2,24 C | 2,11 B |
| <b>AP</b>    | 2,12 D                                     | 2,49 C | 1,95 D | 2,16 B |
| <b>AA</b>    | 1,67 E                                     | 1,63 E | 1,54 E | 1,42 C |

\* Médias de quatro repetições com a mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

\*\* Legenda: FSEI – floresta secundária estágio inicial; FSEM – floresta secundária estágio médio; FSEA – floresta secundária estágio avançado; PMM- Pasto Misto Manejado, AP- Agricultura Perene e AA- Agricultura Anual.

A fração humina predomina no solo devido sua característica como, alta massa molecular e à forte interação com a fração mineral do solo conferindo resistência à degradação microbiana (Orlov, 1992; Stevenson, 1994).

Quanto às frações alcalino-solúveis, observou-se maior acúmulo dos C-FAH nas camadas mais superficiais e decréscimo em profundidade. Trata-se de uma fração insolúvel em meio ácido, característica predominante em regiões de solos tropicais e subtropicais (Souza & Melo, 2003), A fração C-FAF ocorreu em todas as camadas das áreas avaliadas,

este resultado que pode ser atribuído a sua alta solubilidade e mobilidade do mesmo (Benites et al., 2001),

O conteúdo de C-FAH foi menor do que o C-FAF, o que é observado em solos tropicais no qual se tem menor intensidade do processo de humificação, devido ao elevado grau de mineralização dos resíduos, às restrições de bases trocáveis, diminuindo a atividade biológica nos solos mais intemperizados (Canellas et al., 2002). Os maiores valores médios de C-HUM e C-FAH foram encontrados, de modo geral, nas áreas de FSEA e PMM, podendo estar relacionados à qualidade do material vegetal, serapilheira e aporte radicular das gramíneas, já que estas áreas se encontram abandonadas. Segundo Carneiro et al., (2009) a preservação da matéria orgânica pode nestas áreas pode ser devido a não mobilização do solo.

Os menores teores para o carbono associado às substâncias húmicas foram verificados nas áreas de AA e AP. Por terem sido submetidas à maior revolvimento este processo pode ter intensificado a mineralização da matéria orgânica do solo desfavorecendo a formação de substâncias húmicas (Dormaar, 1979).

## 5. CONCLUSÕES

A ausência do revolvimento do solo nas áreas de floresta na área de PMM associado à cobertura de gramíneas proporcionou menores valores de Ds nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Quanto à macro e microporosidade ocorreu à diminuição dos valores de Ds, e conseqüente melhoria da porosidade Na área de AA o manejo adotado acarretou em menores valores de microporosidade na profundidade de 0-5 cm.

A cobertura de gramíneas proporciona melhor agregação ao solo na área de PMM. Entre os índices de estabilidade de agregados estáveis em água, o DMG mostrou-se mais eficiente para evidenciar diferenças decorrentes da cobertura vegetal e manejo, entre as seis áreas avaliadas, quando comparado com o DMP, na camada superficial do solo.

A técnica de tomografia computada se mostrou eficiente na avaliação dos atributos edáficos porosidade, DS e DA, avaliando de maneira mais precisa e em menor escala, podendo estes resultados ser comparados com as técnicas tradicionais de análise dos solos.

O uso do georadar em complemento as medições de resistência à penetração do solo permitiu evidenciar alterações nas propriedades edáficas em profundidade nas distintas áreas florestais e com uso agrícola. O emprego dessa ferramenta gerou informações de forma rápida, não destrutiva e contínua em um transecto, permitindo a análise de variações no solo ao longo do trabalho de campo. O sistema radicular das árvores nas áreas de fragmento florestal está promovendo o aumento da RSP na profundidade de 20-40 cm. E nas áreas de PMM, AP e AA a presença de minerais primários aumenta a RSP ao longo de todo o perfil.

Os atributos químicos avaliados funcionaram como indicadores da qualidade do solo sendo sensíveis aos diferentes sistemas, especialmente na camada de 0-5 cm. As áreas de FSEA e PMM apresentam estágio avançado de humificação e o manejo adotado nas áreas de agricultura acelera o processo de mineralização da MOS.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL-AZIZ, A.; SAURY, C.; BUI XUAN, V.; YOUNG, P. On the material characterization of a composite using micro CT image based finite element modeling. **Smart Structures and Materials and NDE**, 2006, San Diego, Bellingham: SPIE, v.6176, n.605, p.1- 8, 2006.
- ALMEIDA, D.L.; SANTOS, G.A.; DE-POLLI, H.; CUNHA, L.H.; FREIRE, L.R.; SOBRINHO, N.M.B.A.; PEREIRA, N.N.C.; EIRE, P.A.; BLOISE, R.M.; SALEK, R.C. **Manual de Adução para o Estado do Rio de Janeiro**, Itaguaí, Editora UFRRJ, 1988, 179p.
- ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 933-942, 1999.
- ANDERSON, S. H.; PEYTON, R. L.; GANTZER, C. J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. **Geoderma**, v. 46, n.13, p. 29, 1990.
- ARANHA, P.R.A.; AUGUSTIN, C.H.R.R.; SOBREIRA, F.G., The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics. **Journal of Applied Geophysics**, v.49, p. 195-210, 2002.
- ARAÚJO, E.A.; LANI, J.L.; AMARAL, E.F. & GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo Amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 307-315, 2004.
- ARAÚJO, M. A; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob Mata Nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28: p. 337-345. 2004.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality, In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). *Methods for assessing soil quality*. **Soil Science Society of America**, Madison, (SSSA special publication, 49), p. 123-141, 1996.
- ARSHAD, M.A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.88, p. 153–160, 2002.
- ATKINSONA, B.S; SPARKES, D.L.; MOONEY, S.J., The impact of soil structure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*), **Europe Journal Agronomy**, v.30, p. 243–257, 2009.
- BARRETO, A.C.; FREIRE, M.G.S.; NACIF, P.G.S.; ARAÚJO, Q.R.; FREIRE, F.J.; INÁCIO, E.S.B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1471-1478, 2008.
- BARRETO, A.C.; LIMA, F.H.S.; FREIRE, M.B.G.S.; ARAÚJO, Q.R.; FREIRE, F.J. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Revista Caatinga**, v.19, n.4, p. 415-425, out/dez 2006.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. The thermal regime of soils. **SoilPhysics**, New York v.4, p. 253-283, 1972.

- BAYER, B.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P.R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, v.238, p.133–140, 2002.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica, In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, Porto Alegre: Genesis, 1999, p. 9-23.
- BENDING, G.D.; TURNER, M.K.; RAYNS, F.; MARX, M.C.; WOOD, M. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes, **Soil Biology & Biochemistry** v.36, p. 1785–179, 2004.
- BENITES, V.M.; MADARI, B.; MACHADO, P.L.O.A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003, 7 p., (Comunicado Técnico).
- BENITES, V.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MENDONÇA, E.S.; MARTIN NETO, L. Caracterização da matéria orgânica e micromorfologia de solos sob campos de altitude no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 661-674, 2001.
- BERTOL, I. Degradação física do solo sob a cultura do alho, **Revista Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.2, p. 47-50, 1989.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E. F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico Álico afetadas pelo manejo do solo, **Revista Ciência Rural**, v.30, n.1, p. 91-95, 2000.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p. 575-580, 2004.
- BEVAN, B.; KENYON, J. **Ground-probing radar for historical archaeology**, MASCA (Museum Applied Science Center for Archaeology), University of Pennsylvania, v.11, 1975, p. 2–7 (Boletim Informativo).
- BONIAK, R.; CHONG, S.K.; INDORANTE, S.J.; DOOLITTLE, J.A. Application of ground-penetrating radar in golf course management, **Handbook of Agricultural Geophysics**, p. 345-351, 2008.
- BORGES, A.L.; KIEHL, J.C.; SOUZA, L.S. Alteração de Propriedades Físicas e Atividade Microbiana de um Latossolo Amarelo Álico Após o Cultivo com Fruteiras Perenes e Mandioca, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 1019-1025, 1999.
- BRADY, N.; WEIL, R.R. **The nature and properties of Soils** (12 ed.). Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1999, p. 321–766.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review, **Geoderma**, v.124, p. 3-22, 2005.
- BUTNOR, J.R.; DOOLITTLE, J.A.; KRESS, L.; COHEN, S.; JOHNSEN, K.H. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeast tern United States. **Tree Physiology**, v.21, p. 1269–1278, 2001.



- CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, p. 147-158, 2006.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**, Piracicaba: ESALQ, 1997, 132 p.
- CANELLAS, L.P.; BERNER, P.G.; SILVA, S.G.; BARROS E SILVA, M.; SANTOS, G.A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p. 133-143, 2000.
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M. Propriedades Químicas de um Cambissolo Cultivado com Cana-de-Açúcar, com Preservação do Palhico e Adição de Vinhaça por Longo Tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 935-944, 2003.
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; RUMJANEK, V.M.; GURIDI, F.; OLIVARES, F.L.; SANTOS, G.A.; BRAZ FILHO, R. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an ultisol under cultivation of eucalyptus and sugar cane. **Revista Terra**, Chapingo, Mexico, v.20, p. 371-381, 2002.
- CARNEIRO, C.E.A.; JUNIOR, N.J.M.; AZEVEDO, M.C.B.; ANDRADE, E.A.; KOGUISHI, M.S.; DIEHL, R.C.; RICCE, W.S.; PASSARIN, A.L.; VAZ, R.H.M.; STELMACHUK, T.L.L.; GUIMARÃES, M.F.; RALISCH, R. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total e carbono residual de um Latossolo Vermelho Eutroférico. **Revista Ciências Agrárias**, Londrina, v.30, n.1, p. 5-10, jan./mar. 2009.
- CARPENEDO, V.; MIELNICZUCK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p. 99-105, 1990.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 527-538, 1998.
- CESAR, E.; CHICATI, M.L.; FABRO, F.D.; HATA, F.T.; NANNI, M.R.; OLIVEIRA, R.B.; GROFF, E.C. Uso de GPR na avaliação de atributos de solo em área sob plantio de cana-de-açúcar. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, **Anais...** Natal-RN, 2009.
- CHAVES, H.M.L.; SANTOS, L.B., Ocupação do solo, fragmentação da paisagem e qualidade da água em uma pequena bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.6, p.922-930, 2009
- CHUNG, H.; GROVE, J.H.; SIX, J., Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p. 1132-1139. 2008.
- CIDE Centro de Informações e dados do Rio de Janeiro, **Índice de qualidade dos municípios, Rio de Janeiro**: Fundação CIDE, 2002, (CD).
- COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. NifTAL Project, University of Hawaii at Manoa, USA, 1989, 249 p.
- CONAMA. **Resolução 006 de 4 de maio de 1994**, Ministério do Meio Ambiente, Disponível em :<<http://www.mma.gov.br/conama/legiano1.cfm>>. Acesso em : 23 set. 2011.

- CONLIN, T.S.S.; DRIESSCHE, R. Response of soil CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia. **Canadian Journal of Soil Science**, v.80, p. 625–632, 2000.
- COOTE, D.R.; RAMSEY, J.F. Quantification of the effects of over 35 years of intensive cultivation on four soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.63, p. 1-14, 1983.
- CORDEIRO, F.C.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; STAFFANATO, J.B.; ZONTA, E. Avaliação de atributos edáficos em áreas de pastagens em relevo movimentado em Itaperuna-RJ. **Revista Caatinga** (Mossoró,Brasil), v.21, n.3, p. 179-191, 2008.
- CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p. 289-298, 1999.
- COSTA, F.P.M., Utilização do permeâmetro guelph e penetrômetro de impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas. 2007. **Revista Caminhos de Geografia** Uberlândia v.8, n.24, p. 131-143, 2007
- COSTA, F.P.M.; NISHIYAMA, L. Utilização do permeâmetro de Guelph e penetrômetro de impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas. **Caminhos de Geografia**, v.8, n.24, p. 131–143, 2007.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37, p. 531-551, 1989.
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). Methods of soil analysis. **American Society of Agronomy**, Madison, v.1, p. 545-556, 1965.
- DEXTER, A.R. Soil structure: the key to soil function. **Adv. GeoEcology**, v.35, p. 57–69, 2002.
- DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p. 55-94, 2000.
- DIAS JÚNIOR, M. S. **Notas de aulas de física do solo**. Lavras: Departamento de Ciência do Solo, UFLA, p.168. 1996.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality, In: DORAN J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Spec. **SSSA**, Madison, v.35, p. 3-21, 1994.
- DORMAAR, J. F. Organic matter characteristics of undisturbed and cultivated Chernozemic and Solonchic A horizons. **Canadian Journal Soil Science**. v.59, p.349-356, 1979.
- ELLIOT, T.R., HECK, R.J. A comparison of optical and X-ray CT technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma**, v.141, p. 60-70, 2007.
- ELLIOT, T.R.; HECK, R.J. A comparison of 2D vs. 3D thresholding of X-ray CT imagery. **Canadian Journal Soil Science**, v.87, p. 405-412. 2007.
- ELLIOT, T.R.; REYNOLDS, W.D.; HECK, R.J. Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, v.156, p 133-142, 2010.
- ELLIOTT, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p. 627–633, 1986.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006, 306 p.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

FEITOSA, A.A.N. **Diversidade de espécies florestais arbóreas associada ao solo em toposseqüência de fragmento de mata atlântica de Pernambuco**. 2004. 102f (Dissertação Mestrado), Universidade Federal Rural do Pernambuco, Recife.

FIGUEIREDO, C.C.; RAMOS, M.L.G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo, **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.24, n.3, p. 24-30, Jul/Set, 2008.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.3, p. 487-493, 2000.

FOURIE, W.; SAID, R.; YOUNG, P.; BARNES, D.; The simulation of pore scale fluid flow with real world geometries obtained from X-Ray computed tomography. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL, **Anais...** Boston, 2007. 6p.

FOX, D.M.; BRYAN, R.B.; FOX, C.A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. **Geoderma**, v. 120, p. 109-120.2004.

FRAGA, V. S.; SALCEDO, I. H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsystems farming. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.1, p. 215-224, 2004.

FRANCELINO, M.R.; LANI, J.L.; FIRME SÁ, M.M.; ARANHA, P.R.A.; VILARINHO, E.S. Estudo do lençol freático utilizando radar de penetração do solo. XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2007, Natal. **Anais...** Natal-RN 2007.

FREDDI, O.S.; CENTURON, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.3, p. 477-486, 2007.

FREELAND, R.S.; SOROCHAN, J.C.; GODDARD, M.J.; MCELROY, J.S. Using Ground Penetrating Radar to Evaluate Soil Compaction of Athletic Turfgrass Fields, **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v.24, p. 509-514, 2008.

FREIXO, A.A.; MACHADO, P.L.O.A.; GUIMARÃES, C.M.; SILVA, C.A.; FADIGAS, F.S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p. 425-434, 2002.

FRIMMEL, F.H.; CHRISTMAN, R.F. **Humic substances and their role in the environment**: Dahlem workshop reports. Chichester: John Wiley, 1987, 271 p.

FUNDAÇÃO INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (RJ). **A Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro**. Disponível em: <[www.ief.rj.gov.br/mata/conteudo.htm](http://www.ief.rj.gov.br/mata/conteudo.htm)> Acesso em 18 mar de 2007.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA & INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**: período 1995-2000, São Paulo, 2002, 47 p.

GALINDO, I.C.L.; RIBEIRO, M.R.; SANTOS, M.F.A.V.; LIMA, J.F.W.F.; ABREU, R.F.; FERREIRA, L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no

município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p. 1283-1296. 2008.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, v.26, p. 193-207, 2002.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA-RODRIGUES, E.; BARROS, N.F. Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no sudeste da Bahia, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 1165-1179, 2008.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; MAY, P. Sistemas agroflorestais e o planejamento do uso da terra: Experiência na região norte-fluminense, RJ. In: MACÊDO, J.L.V.; WANDELLI, E.V.; SILVA JÚNIOR, J.P. eds, **Sistemas agroflorestais: Manejando a biodiversidade e compondo a paisagem rural**, Manaus, Embrapa, 2001, p. 130-136.

GE Healthcare. **Explore locus user guide**, Technical Publication Direction 2394683 Revision 1a, 2005, p. 1-74.

GIONGO, V.; BISSANI, C.; SALET, R.L.; MIELNICZUK, J.; **Complexação de alumínio por sistemas de culturas no sistema plantio direto**. XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Resumos Expandidos, Rio de Janeiro, RJ, EMBRAPA Solos; SBCS, 1997, CD-ROM.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital image processing**. Prentice-Hall, Upper Saddle Creek 2002, 793p.

GREVERS, M.C.J.; DE JONG, E., ST.; ARNAUD, R.J., 1989. The characterization of soil macroporosity with CT scanning. **Canadian Journal Soil Science**, v.69, p. 629-637, 1989.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil Compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B.A. **Methods for assessment of soil degradation: advances**. Soil Science, Boca Raton: CRS Press, p. 167-79. 1998.

HAMZA, M.A.; Anderson, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solution. **Soil & Tillage Research**, v.82, p. 121-14, 2005.

HECK, R.J.; ELLIOT, T.R. Distinguishing among soil solid phases using micro-CT scanning. **Abstract**. 18th World Congress of Soil Science July 9-15, 2006, Philadelphia, PA. 2006.

HERMAVAN, B.; CAMERON, K.C. Structural changes in a silt loam under long-term conventional or minimum tillage. **Soil & Tillage Research**, v.26, p. 139-150, 1993.

HERRICK, J. E. Soil quality: an indicator of sustainable land management? **Applied Soil Ecology**, v.15, p. 75-83, 2000.

HERRICK, J.E.; WANDER, M.M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition and soil biological activity. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, J.; STEWARD, B.A. **Advances in Soil Science: Soil Processes and the Carbon Cycle**. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 405-425, 1998.

HILL, R.L.; CRUSE, R.M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.1270-1273, 1985.

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

- HINKEL, K.M.; DOOLITTLE, J.A.; BOCKHEIM, J.G.; NELSON, F.E.; PAETZOLD, R.; KIMBLE, J.M.; TRAVIS, R. Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, **Permafrost and Periglacial Processes**, Barrow, Alaska, v.2, 2001, p. 179-190.
- HOUNSFIELD, G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. **The British Journal Radiology**. v.46, p. 1016–1022, 1973.
- HOUNSFIELD, G.N., Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. **The British Journal of Radiology**, v.46, p. 1016-1022. 1973.
- IASSONOV, P.; GEBRENEGUS, T.; TULLER, M. Segmentation of X-ray CT images of porous materials: a crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. **Water Resources Research**, v. 45, 2009.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. IBGE, Rio de Janeiro. 1992. 92 p.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v.79, p. 9-19, 2000.
- ISLAN, K.R.; WEIL R.R. Soil quality indicator properties in Mid-Atlantic soils as influenced by conservation management, **Journal of Soil and Water Conservation**, v.55, p. 69-78, Jan/Mar, 2000.
- KASPER, M.; BUCHAN, G.D.; MENTLER, A.; BLUM, W.E.H. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. **Soil & Tillage Research**, v.105, p. 192–19, 2009.
- KIELHL, E.J. **Manual de Edafologia**. 1.ed, Piracicaba, Editora Agronômica Ceres, 1979, p.264.
- KUMADA, K. **Chemistry of soil organic matter**. Amsterdam: Elsevier, p. 241, 1987 (Developments in Soil Science, 17).
- LAL, R. **Métodos para avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos**, Emprapa Meio Ambiente, 1999, 97 p.
- LANGMAACK, M. Earthworm communities in arable land influenced by tillage, compaction, and soil. **Z. Okol Natursch**, v.8, p. 11–21. 1999.
- LANI, J. L.; FRANCELINO, M.R.; ARANHA, P.R.A.; ROSADO, V.B.; VILARINHO, E.S. **Uso de GPR na identificação da profundidade do lençol freático e na mudança textural**. XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2005, Recife, Anais do XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo em CD-ROM, 2005.
- LIMA, A.M.N., SILVA, I.R., NEVES, J.C.L., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F., MENDONÇA, E.S., DEMOLINARI, M.S.M., LEITE, F.P., Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce-MG, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1053-1063, 2008.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v.116, p. 107–136, 2003.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; ARINELLI, G.P.; BRITO, R.J.; ANJOS, L.H.C. Caracterização da matéria orgânica sob diferentes sistemas de manejo agrícola e cobertura vegetal em solos de Tabuleiro, no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Agronomia**, UFRRJ, v.2, p. 49-52, 2004.

- MAFRA, A.L.; GUEDES, S.F.F.; FILHO, O.K.; SANTOS, J.C.P.; ALMEIDA, J.A.; ROSA, J.D. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.2, p. 217-224, 2008.
- MARTINS, G.C.; TEXEIRA, W.G.; MACEDO, R.S. **Resistência a penetração como indicador da qualidade física do solo na província pretrolífera de Urucu-Coari-Am.** Workshop CT Petro INPA, 2006.
- MARTINS, I.C.M.; SOARES, V.P.; SILVA, E.; BRITES, R.S. Diagnóstico ambiental no contexto da paisagem de fragmentos florestais naturais “ipucas” – no Município de Lagoa da Confusão-Tocantins. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, p. 299-309, 2002.
- MATSUOKA, M.; MENDES, I.C.; LOUREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solo sob vegetação nativa e sistemas agrícolas e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 425–433, 2003.
- MÉDICE, M.F.S. **Estudo da profundidade do lençol freático em áreas com diferentes usos do solo utilizando georadar**, 2007, 30p. (Monografia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica RJ.
- MELLO, F.A.F.; SOBRINHO, M.O.C.B.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R.I.; NETTO, AC.; KIEHL, J.C. **Fertilidade do solo**. São Paulo, Nobel, 1989, 399 p.
- MELLONI, R.; MELLONI, E.G.P.; ALVARENGA, M.I.N.; VIEIRA, F.B.M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 2461-2470, 2008.
- MENEZES, C.E.G. **Diagnóstico de degradação do solo em função da topografia e cobertura vegetal no município de Pinheiral, RJ**. 1999, 186p (Dissertação de Mestrado), UFRRJ, Instituto de Agronomia, Seropédica, RJ.
- MENEZES, C.E.G. **Integridade de paisagem, manejo e atributos do solo no Médio Vale do Paraíba do Sul, Pinheiral-RJ**. 2008. 164f. (Tese de Doutorado), UFRRJ, Instituto de Agronomia, Seropédica, RJ.
- MIRANDA, C.C. **Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de Mata Atlântica e em plantios abandonados de eucalipto, Reserva Biológica União-RJ**. 2005. 82f. (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.
- MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O.; RAVAN, M.A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p. 209-215, 1992.
- MONREAL, C.M.; DINEL, H.; SCHNITZER, M.; GAMBLE, D.S.; BIEDERBECK, V.O. Impact of carbon sequestration on functional indicators of soil quality as influenced by management in sustainable agriculture, In: LAL, R., KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil Processes and the Carbon Cycle**. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 435–457, 1998.
- MUNSHOWER, F.F. **Practical handbook of disturbed land revegetation**. CRC Press, Boca Raton, Lewis Publishers, 1994. 265p.
- NEVE, S.; HOFMAN, G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. **Biology and Fertility of Soils**, v.30, p. 544–549, 2000.

- NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n.5, p. 1410-1415, 2006.
- OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N. **A Geologia de Engenharia**, ABGE, SP, p. 166, 1998.
- OLIVEIRA, J.D. de. **Pedologia aplicada. Jaboticabal**, FUNEP, 2001, 414p.
- OLIVEIRA, J.D.; JACOBINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil** - Guia auxiliar para seu reconhecimento, Jaboticabal, FUNEP, 1992, 201 p.
- OLIVEIRA, J.T. **Evolução do uso da terra e dos solos na bacia de captação da barragem Água Fria I e II em Barra do Choça/BA**. 2006, p. 113 (Dissertação de Mestrado) Ilhéus (BA): UESC.
- ORIGINLAB CORPORATION. **Origin Lab Data Analysis and Graphing Software: OriginPro Version 7.5**. Northampton, MA, USA. 2004.
- ORLOV, D.S. **Humic substances of soils and general theory of humification**. Moscow: University Press, 323p. 1992.
- PACHEPSKY, Y.; YAKOVCHENKO, V.; RABENHORST, M.C.; POOLEY, C.; SIKORA, L.J., Fractal parameters of pore surfaces as derived from micromorphological data: Effect of long-term management practices. **Geoderma**, v.74, p. 305-319, 1996.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil & Tillage Research**. v.79, p. 131–14, 2004.
- PALMIERI, F.; LARACH, J.O.I. Pedologia e geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**, Rio de Janeiro, Bertrand, 1996, 394 p.
- PAVLIDIS, T.; LIOW, Y. Integrating region growing and edge detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.12, n.3, p. 225–233, 1990.
- PEDRO VAZ, C.M.; PRIMAVESI, O.; PATIZZI, V.C.; LOSSI, M.F. Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto. Embrapa Instrumentação Agropecuária, 51 ed., São Carlos–SP, 2002, 5 p. (**Comunicado Técnico**)
- PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46: p. 445-450. 1982.
- PEYTON, R.L.; GANTZER, C.J.; ANDERSON, S.H.; HAEFFNER, B.A.; PFEIFER, P. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X-ray computed tomography. **Water Resources Research**, v.30, p. 691-700, 1994.
- PIERRET, A.; CAPOWIEZ, Y.; BELZUNCES, L.; MORAN, C.J., 3D reconstruction and quantification of macropores using computed tomography and image analysis. **Geoderma**, v.106, p. 247-271, 2002.
- PINHEIRO, E.F.M. **Frações orgânicas e agregação em Latossolo Vermelho em função dos sistemas de oleráceas em Paty do Alferes, RJ**, 2002, 91 p. (Dissertação de Mestrado), UFRRJ, Instituto de Agronomia, Seropédica, RJ.
- PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.77, p. 79-84, 2004.

- PIÑUELA, J.; ALVAREZ, A.; ANDINA, D.; HECK, R.J.; TARQUIS, A.M.; Quantifying a soil pore distribution from 3D images: Multifractal spectrum through wave let approach. **Geoderma**, v.155, p. 203–210, 2010.
- PIRES, L.F.; PILOTTO, J.E.; TIMM, L.C.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Qualitative and quantitative analysis of soil samples by computerized tomography. UEPG. **Ciências Exatas e da Terra**, Ponta Grossa, v.11, n. 2 p. 7-15, 2005.
- PRATT, W. **Digital Image Processing**. Wiley & Sons, New York 1991, 698p.
- RACHMAN, A.; ANDERSON, S.H.; GANTZER, C.J. Computed-tomographic measurement of soil macroporosity parameters as affected by stiff-stemmed grass hedges. **Journal Soil Science Society of America**, v.69, p. 1609-1616, 2005.
- RAJAB, M.I.; ALAWI, M.H.; SAIF, M.A. Application of Image Processing to Measure Road Distresses, WSEAS Transactions on Information Science & Applications, **Issue 1**, v.5, p.7 2008.
- REINERT, D.J. **Recuperação de solos em sistemas agropastoris**: recuperação de áreas degradadas. Viçosa: UFV, Departamento de Solos, Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998, 251 p.
- REZENDE, J.O. **Conseqüências da aplicação de vinhaça sobre algumas propriedades físicas de um solo Aluvial (estudo de um caso)**. 1979. 112p. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas). Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- REZENDE, W. S.; GOBBI, C. N.; SILVA, C. E.; ALMEIDA, J. R. Recuperação de voçorocas na zona rural do município de Mineiros (GO): financeiramente viável e ambientalmente sustentável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v.2, n.2, p.64-81, 2011.
- RICHARD, A.; FILHO, J.T.; BRITO, O.R.; LLNILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeito. **Revista Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26(3):321-344, 2005.
- RINGROSE-VOASE, A.J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. **Soil Science Journal**, v.35, p. 673-684, 1984.
- ROPPA, C. **Avaliação da dinâmica de restauração de ecossistemas perturbados da mata atlântica em uma região de exíguos atributos ambientais**, Nova Iguaçu–RJ, 2009, 129 p (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica RJ.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002, 86 p.
- ROSIN, P. Unimodal thresholding. **Pattern Recognition**, v.34, n.11, p.2083–2096. 2001.
- RUSSEL, E.J.; RUSSEL, R.W. **Soil conditions and plant growth**. London, Longman & Green, 1961, 770 p.
- RYAN, P.J.; MCGARITY, J.W. The nature and spatial variability of soil properties adjacent to large Eucalyptus forest. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p. 286-292, 1983.
- SAHOO, P.; SOLTANI, S.; WONG, A., A survey of thresholding techniques. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v.41, n.11, p. 233–260, 1988



- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.11–21, 2008.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SAMPAIO, Y. **Desertificação: conceitos, causas, conseqüências e mensuração**. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2002. 85p.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 5 ed, Viçosa: SBCS, 2005, 100 p.
- SCHLUTER, S.; WELLER, U.; VOGEL, H.J. Segmentation of X-ray microtomography images of soil gradient masks. **Computers & Geosciences**, v. 36, p. 1246-1251, 2010.
- SCHNITZER, M. Humic substances: chemistry and reactions. In: SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. (Ed.), *Soil organic matter*, New York: Elsevier, 1978, p. 1-64.
- SEZGIN, M.; SANKUR, B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. **Journal of Electronic Imaging**, v.13, n. 1, p. 146–165, 2004.
- SHUKLA, M.K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil & Tillage Research** v.87, p. 194–20, 2006.
- SHUKLA, R.S.; ALAM, M.; KHALIQ, A.; BAHL, J.R.; SINGH, H.N.; KHANUJA, S.P.S.; Blossom blight, a new disease of *Rauvolfia serpentina*. **Journal Mycol Plant Pathology**, 36, p.427-430, 2006.
- SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R.; CARVALHO, F.G.; SILVA, V.N.; SILVA, L.E.S.F. Impact of sugarcane cultivation on soil carbon fractions, consistence limits and aggregate stability of a Yellow Latosol in Northeast Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.19, p. 420-424, 2006.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p. 877-883, 1997.
- SILVA, C.F., PEREIRA, M.G., LOSS, A., SILVA, E.M.R., CORREIA, M.E.F. Alterações químicas e físicas do solo em áreas de agricultura no entorno do Parque Estadual da Serra do Mar, Ubatuba (SP). **Revista. Ciências. Agrárias de Belem**, n. 46, p.9-28, 2006.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 113-117, 1997.
- SILVA, J. R. C. Erosão e produtividade do solo no semi-árido. In: OLIVEIRA, T. S.; ASSIS JR., R. N.; ROMERO, R. E.; SILVA, J. R. C, (ed.), **Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido**. Fortaleza: UFC, cap.10, p. 170-213. 2000.
- SILVA, L.F. Alterações edáficas em “solos de tabuleiro” (Haplorthoxs) por influência do desmatamento, queima e sistemas de manejo. **Revista Theobroma**, v.11, p. 5-9, 1981.
- SILVA, R.C.; PEREIRA, J.M.; ARAÚJO, Q.R.; PIRES, A.J.V.P.; REI, A.J.D.; Alterações nas propriedades químicas e físicas de um Chernossolo com diferentes coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 101-107, 2007.
- SILVA, R.F. da. **Roça caiçara: dinâmica e nutrientes, propriedades físicas e fauna do solo em um ciclo de cultura**. 1998. 167p. (Dissertação de Mestrado – CPGA-CS) UFRRJ, Seropédica-RJ.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C.VAN. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN. Eds. **Soil compaction in crop production**, Amsterdam, Elsevier, p. 1-21, 1994.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, **Glossary of Soil Science Terms**, Madison, WI, USA, 1996. 44p.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, **Glossary of Soil Science Terms**, Soil Science Society of America, Madison, WI, 1997. 134p.

SOUZA, W.J.O.; MELO, W.J. Matéria orgânica de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 1113-1122, 2003.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**, v.36, n.4, 2006.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry. Genesis, composition, reaction**. 2.ed. New York: John Wiley, 1994. 443p.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2, ed. New York: J. Wiley, 1999, 427 p.

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

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI-NETO, V.L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**, STAB, Açúcar, Álcool & Subprodutos, v.1, n.3, p. 18-23, jan./fev, 1983.

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – I Efeitos nas propriedades físico - hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p. 207-212, 2002.

STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections**. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, p. 1-184. 2003.

STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; CASANOVAS, E.M. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p. 1466-1472, 1997.

SWIFT, R.S. Organic matter characterization, In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMNER, M.E. (Eds.), **Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods**. SSSA: American Society of Agronomy, (SSSA, Book Series, 5), 1996, p. 1011-1020.

TABOR, G.; YOUNG, P.G.; BERESFORD WEST, T.; BENATTAYALLAH, A. Mesh construction from medical imaging for multiphysics simulation: Heat transfer and fluid flow in complex geometries. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, 2, p. 126-135, 2007.

TAINA, A.R.; HECK, R.J.; ELLIOT, T.R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 88 p. 1-20, 2007.

TAINA, I.A.; HECK, R.J.; ELLIOT, T.R.; SCAIFF, N. Micromorphological and X-ray  $\mu$ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. **Geoderma**, v.158, p. 110–119, 2010.

- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Soil Science Journal**, v.33, p. 141-163, 1982.
- TOLEDO, L.O.; PEREIRA, M.G.; MENEZES, C.E.G. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em florestas secundária localizadas na região de Pinheiral, RJ. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.2. p. 9-16, 2002.
- TOLLNER E.W. X-Ray computed tomography applications in soil ecology studies. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v.34, p. 251-260, 1991.
- TRUJILLO, W.; FISHER, M.J.; LAL, R. Root dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. **Soil & Tillage. Research**, v.87, p. 28–38, 2006.
- UCHA, J.M.; BOTELHO, M.A.; VILAS BOAS, G.S.; RIBEIRO, L.P.; SANTANA, P.S. Uso do Radar Penetrante no Solo (GPR) na investigação dos solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p. 373-380, 2002.
- VIANA, V.M. Biologia e manejo de fragmentos florestais naturais. VI Congresso florestal brasileiro, 1990, Campos do Jordão – SP, **Anais... VI Congresso Florestal Brasileiro SBS/SBEF**, p. 113-118, 1990.
- VOGEL, H.J.; KRETZSCHMAR, A. Topological characterization of pore space in soil sample preparation and digital image-processing. **Geoderma** v.73 n.1, p.23–38. 1996.
- VOGEL, H-J.; WELLER, U.; SCHLUTER, S. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. **Computer & Geosciences**, v. 10, p.1016, 2010.
- WALKER, J.; REUTER, D.J. **Indicators of catchment health: a technical perspective**. Melbourne: CSIRO, 1996, 174 p.
- WARNER G.S.; NIEBER J.L.; MOORES, I.D.; GEISE R.A. Characterizing macropores in soil by computer tomography. **Soil Science society of America Journal**, v.53, p. 653-660, 1989.
- WATSON, I.G.; LEE, P.D.; DASHWOOD, R.J.; YOUNG, P. Simulation of the mechanical properties of an aluminum matrix composite using X-ray microtomography. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.37A, p. 551-558, 2006.
- WEIL, R.R.; LOWELL, K.A.; SHADE, H.M. Effects of intensity of agronomic practices on a soil ecosystem. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 8, p. 5-14, 1993.
- WILDENSCHILD, D.; HOPMANS, J.; VAZ, C.; RIVERS, M.; RIKARD, D.; CHRISTENSEN, B. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. **Journal of hydrology**, v. 267, n.3, p. 285-297, 2002.
- YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p. 1467-1476, 1988.