



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

ÍNDICES COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM CLASSES DE
SOLO

BRUNO LAECIO DA SILVA PEREIRA

FORTALEZA

2012



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

ÍNDICES COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM CLASSES DE
SOLO

BRUNO LAECIO DA SILVA PEREIRA

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará - UFC, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior

FORTALEZA

2012

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

-
- P489i Pereira, Bruno Laecio da Silva.
 Índice s como indicador de qualidade física em classes de solo / Bruno Laecio da Silva
 Pereira –
 2012.
 94 f. : il., color., enc. ; 30 cm.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências
 Agrárias,
 Departamento de Ciências do Solo, Mestrado em Agronomia, Solos e Nutrição de Plantas,
 Fortaleza,
 2012.
 Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.
 Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato Assis Júnior.
1. Textura do solo. 2. Estrutura do solo. 3. Geometria porosa. I. Título.

ÍNDICE S COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM CLASSES DE SOLO

BRUNO LAECIO DA SILVA PEREIRA

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará - UFC, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas.

Dissertação aprovada em: 28 / 09 / 12

BANCA EXAMINADORA

Raimundo Nonato de Assis Júnior - Doutor
(Orientador)

Jaedson Cláudio Anunciato Mota - Doutor
(Examinador)

Laercio Duarte Souza - Doutor
(Examinador)

A toda minha família, especialmente à minha mãe Jaciara Maria da Silva Pereira, minha irmã Ana Julia da Silva Pereira, meu irmão Mauricio Adillo da Silva Pereira, minha tia Janete Maria Nascimento da Silva, meus avós (*in memoriam*) Julieta Nascimento da Silva e João Pereira da Silva.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado forças, estímulo e paciência para vencer as dificuldades durante a realização do curso.

À Universidade Federal do Ceará, em especial ao Departamento de Ciências do Solo pela oportunidade de realizar o curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, ao Banco do Nordeste do Brasil – BNB e ao Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD 125/2007), por financiar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof^o. Dr. Raimundo de Nonato Assis Júnior pela orientação, profissionalismo, incentivo, amizade e pelo exemplo de dedicação e confiança, acreditando em mim para a realização deste trabalho, o que muito contribuiu na minha formação profissional.

Aos Professores do Departamento de Ciência do Solo pelos ensinamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Jaedson por toda a amizade, atenção prestada e auxílio no meu trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo Francisco José, Edilson e aos funcionários da FUNCEME pelo apoio e colaboração.

Aos amigos Alcione Guimarães, Ailton Mascarenhas, Carlos Levi, Jaime dos Santos, José Augusto pelos bons momentos de estudo e auxílios.

Aos colegas do Departamento de Ciências do Solo pela amizade e incentivo.

“O aprendido é aquilo que fica depois
que o esquecimento fez o seu trabalho”.

(Rubem Alves)

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. (A) Curva de retenção de água no solo mostrando o ponto de inflexão e a inclinação ($\text{tg } \omega$) da curva e ponto de inflexão. (B) A curva de retenção de água no mesmo solo submetido às duas diferentes densidades. Fonte Dexter (2004a) ...27
- FIGURA 2. Localização da área de coleta do Cambissolo Háptico ... 31
- FIGURA 3. Esquema do processo de coleta do Cambissolo, o abacaxi (Ananas comosus L. Merrill) com espaçamento 0,80 x 0,30 m e a coleta a 0,10 m do sistema de irrigação ... 32
- FIGURA 4. Localização da Fazenda Normal (EMATERCE), área de coleta do Argissolo Vermelho (Fonte. FUNCEME, 2011) ...32
- FIGURA 5. Localização da Fazenda Experimental Vale do Curu, área de coleta do Neossolo Flúvico ... 33
- FIGURA 6. Amostrador tipo Uhland ... 35
- FIGURA 7. a) Mesa de Tensão; b) Câmara de pressão de Richards ... 39
- FIGURA 8. Diagrama esquemático (A) constituído por: 1- bomba de ar; 2- cilindro de desumificação do ar preenchido com sílica gel; 3- válvula de controle de fluxo; 4- válvula de escape para ajuste da pressão interna; 5- cilindro de ar; 6- válvula de controle de fluxo; 7- compartimento de alocação da amostra de estrutura indeformada de solo; 8- sistema de aquisição de dados constituído por transdutor de pressão e sensores de temperatura e umidade; 9- cabo de transmissão de dados (DB 9); 10- microcomputador para processamento de dados; e fotografia do equipamento para medida da permeabilidade do solo ao ar (B) (BRITO (2010)). ... 40
- FIGURA 9. A análise de agrupamentos das variáveis utilizadas para a formação dos grupos Índice S (S), Macroporosidade (Pma), ... 66

Permeabilidade do solo ao ar (Kar), Estabilidade de Agregado (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Densidade de partícula (Dp), Grau de Floculação (GF), Porcentagem de Sódio Total (PST), Densidade do solo (Ds), Areia, Microporosidade (Pmi), Silte, Matéria Orgânica (M.O), Porosidade Total (α), Argila no Argissolo Vermelho na camada 0-0,15 m.

FIGURA 10 Figura 10. A análise de agrupamentos das variáveis utilizadas ... 67

para a formação dos grupos Índice S (S), Macroporosidade (Pma), Permeabilidade do solo ao ar (Kar), Estabilidade de Agregado (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Densidade de partícula (Dp), Grau de Floculação (GF), Porcentagem de Sódio Total (PST), Densidade do solo (Ds), Areia, Microporosidade (Pmi), Silte, Matéria Orgânica (M.O), Porosidade Total (α), Argila no Cambissolo Háplico na camada 0-0,15 m.

FIGURA 11 Figura 11. A análise de agrupamentos das variáveis utilizadas ... 68

para a formação dos grupos Índice S (S), Macroporosidade (Pma), Permeabilidade do solo ao ar (Kar), Estabilidade de Agregado (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Densidade de partícula (Dp), Grau de Floculação (GF), Porcentagem de Sódio Total (PST), Densidade do solo (Ds), Areia, Microporosidade (Pmi), Silte, Matéria Orgânica (M.O), Porosidade Total (α), Argila no Neossolo Flúvico na camada 0-0,15 m.

LISTA DE GRÁFICOS

- GRÁFICO 1. Curva de retenção de água do solo analisados na profundidade ... 47
de 0-0,15 m.
- GRÁFICO 2. Distribuição volumétrica de poros por diâmetro nos solos ... 48
analisados na profundidade de 0-0,15 m.
- GRÁFICO 3 Distribuição do valor de “S” nos solo analisados na ... 50
profundidade de 0-0,15 m.
- GRÁFICO 4. Ilustração “a”, “b” e “c” regressão linear do índice S e Argila ... 52
(%); “d”, “e” e “f” regressão linear do índice S e Areia (%)
nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m
- GRÁFICO 5 Ilustração “a”, “b”, “c” regressão linear do Índice S e ... 54
densidade do solo (Mg m⁻³); “d”, “e”, “f” regressão linear do
Índice S e diâmetro médio ponderado (DMP (mm)) nos solos
analisados na profundidade de 0 - 0,15 m
- GRÁFICO 6 Ilustração “a”, “b” e “c” corresponde à regressão linear do ... 56
Índice S e porosidade total (cm³cm⁻³); “d”, “e” e “f”
regressão linear do Índice S e macroporosidade (cm³cm⁻³)
nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.
- GRÁFICO 7 Ilustração “a”, “b” e “c” corresponde à regressão linear do ... 57
Índice S e Microporosidade (cm³cm⁻³); “d”, “e” e “f”
regressão linear do Índice S e Grau de Flocculação (%) nos
solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.
- GRÁFICO 8 Gráfico 8. Ilustração “a”, “b” e “c” corresponde à regressão ... 59
linear do Índice S e Matéria Orgânica (%); “d”, “e” e “f”
regressão linear do Índice S e PST (%) nos solos analisados na
profundidade de 0 - 0,15 m.
- GRÁFICO 9 Dispersão (gráfico Biplot) produzida por análise de ... 63
componentes principais para o Argissolo Vermelho na camada
de 0,0-0,15 m. Em que: Ds = densidade do solo, PT =
porosidade total, Pmi = microporosidade, Pma =
macroporosidade, DMP = diâmetro médio ponderado, MO =

matéria orgânica, S= índice S, Kar = permeabilidade do solo ao ar, AG = argila, E.A= Estabilidade de agregados, GF= Grau de Floculação, PSS= Porcentagem de Saturação por Sódio.

GRÁFICO 10 Dispersão (gráfico Biplot) produzida por análise de ... 64
componentes principais para o Cambissolo Háplico na camada de 0,0-0,15 m. Em que: Ds = densidade do solo, PT = porosidade total, Pmi = microporosidade, Pma = macroporosidade, DMP = diâmetro médio ponderado, MO = matéria orgânica, S= índice S, Kar = permeabilidade do solo ao ar, AG = argila, E.A= Estabilidade de agregados, GF= Grau de Floculação, PSS= Porcentagem de Saturação por Sódio.

GRÁFICO 11 Gráfico 11. Dispersão (gráfico Biplot) produzida por análise ... 65
de componentes principais para o Neossolo Flúvico na camada de 0,0-0,15 m. Em que: Ds = densidade do solo, PT = porosidade total, Pmi = microporosidade, Pma = macroporosidade, DMP = diâmetro médio ponderado, MO = matéria orgânica, S= índice S, Kar = permeabilidade do solo ao ar, AG = argila, E.A= Estabilidade de agregados, GF= Grau de Floculação, PSS= Porcentagem de Saturação por Sódio.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	Classificação textural, Argila dispersa em água (ADA) e Grau de floculação (GF) dos solos estudados na profundidade de 0-0,15 m.	... 32
TABELA 2.	Distribuição da fração areia nos solos estudados na profundidade de 0-0,15 m	... 32
TABELA 3.	Atributos químicos relacionados aos solos estudados na profundidade de 0 - 0,15 m	... 32
TABELA 4.	Atributos químicos relacionados aos solos estudados na profundidade de 0-0,15 m.	... 32
TABELA 5.	Tabela 5. Valores dos parâmetros de van Genuchten e índice S dos solos estudados na profundidade de 0-0,15m.	... 33
TABELA 6.	Coefficiente de correlação (r) das variáveis com o índice S nos solos na profundidade de 0 – 0,15 m.	... 36
TABELA 7.	Autovalores e percentual da variância explicada por cada componente.	... 39
TABELA 8.	Tabela 8. Correlação entre cada componente principal e as propriedades físicas e químicas dos solos estudados na camada de 0 - 0,15 m.	... 40

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Hipótese.....	17
1.2 Objetivo.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Qualidade do solo.....	17
2.2 Textura do solo	18
2.3. Densidade de solo (ρ)	19
2.4. Matéria orgânica do solo	20
2.5. Estabilidade e Porosidade do solo	21
2.6. Permeabilidade do solo ao ar	24
2.7. Curva Retenção de Água (θ)	25
2.8. Índice S.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Caracterização da área de coleta	31
3.2 Amostragem.....	35
3.3. Análises de Laboratórias.....	36
3.3.1 <i>Atributos Físicos</i>	36
3.3.1.1 <i>Análise granulométrica</i>	36
3.3.1.2. <i>Argila Dispersa em água</i>	36
3.3.1.3. <i>Densidade do Solo (ρ)</i>	36
3.3.1.4. <i>Densidade de partículas (ρ_s)</i>	37

3.3.1.5. Porosidade do solo (α)	37
3.3.1.6. Microporosidade	37
3.3.1.7. Macroporosidade	38
3.3.1.8. Estabilidade de Agregados e Diamêtro Médio Ponderado	38
3.3.1.9. Curva de Retenção de Água.....	39
3.3.1.10. Permeabilidade do solo ao ar.....	40
3.3.1.11. Índice “S”	41
3.3.2. Atributos Químicos.....	42
3.3.2.1. Carbono Orgânico.....	42
3.3.2.2. Capacidade de Troca Catiônica e Bases Trocáveis.....	42
3.3.2.2.1. Determinação de Calcio e Magnésio Trocável	42
3.3.2.2.2. Determinação de Calcio Trocável.....	42
3.3.2.2.3. Determinação do Potássio Trocável.....	42
3.3.2.2.4. Determinação de Sódio Trocável.....	43
3.3.2.2.5. Valor T (CTC).....	43
3.3.2.2.6. Percentagem de saturação com sódio (PSS).....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. Índice S.....	45
4.2. Regressão e Correlação das variáveis com indice S.....	51
4.3. Análise Multivariada.....	60
5. CONCLUSÕES.....	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
7. ANEXOS.....	88

ÍNDICE S COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM CLASSES DE SOLO

RESUMO

A preocupação com a qualidade do solo tem tido grande destaque dentro do contexto agrícola. Diante disso, tem-se procurado índices que avaliem os níveis de degradações físicas sofridas pelos solos, em função do manejo aplicado. O Índice “S”, parâmetro de avaliação da estrutura do solo, foi proposto por Dexter (2004 a), sendo definido pela inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e, segundo o autor, é um indicativo da porosidade do solo, principalmente de sua distribuição de poros por tamanho e geometria. A porosidade é dividida em duas partes: porosidade textural (influenciada pelo tamanho das partículas primárias do solo), geralmente associada a baixos valores de infiltração de água, pouca trabalhabilidade e qualidade física; e porosidade estrutural (determinada pelas unidades estruturais do solo), sensível a fatores de manejo. Este trabalho teve como objetivo determinar a influência da textura e da estrutura no Índice “S” em diferentes solos do estado do Ceará. As amostras de solo com estrutura deformada e indeformada foram coletadas em três solos de classes texturais distintas (Argissolo Vermelho, Cambissolo Háplico, Neossolo Flúvico) na profundidade de 0-0,15 m. O índice S mostrou sensibilidade às variações na estrutura e textura dos solos analisados. Por meio da análise multivariada foi possível observar que o índice S apresenta uma maior interação com variáveis estruturais (porosidade, estabilidade de agregados, diâmetro médio ponderado). Concluiu-se que o índice S é um indicador da qualidade física do solo e reflete a sua condição estrutural do solo.

Palavras-Chave: textura do solo; estrutura do solo; geometria porosa.

INDEX S AS INDICATOR OF QUALITY PHYSICAL IN DIFFERENT CLASSES OF SOIL

ABSTRACT

Concern for soil quality has acquired greater significance in the agricultural context. Therefore, we have sought indices assessing levels of physical deterioration suffered by the soil, depending on the management applied. The "S" index, a measure of soil physical structure, was proposed by Dexter (2004a,) and is defined by the slope of the tangent line to the inflection point of the soil water retention curve and, according to the author, is indicative of the porosity of the soil, especially its pore distribution by size and geometry. The porosity is divided into two parts: textural porosity (influenced by soil primary particles), usually related to poor water infiltration, poor workability and low physical quality; and structural porosity (determined by soil structural units), sensitive to management factors and whose presence indicates soil with good physical quality. This study aims to determine the index "S" taking into account the influence of texture and structure for different soil types from Ceará state, Brazil. Soil samples deformed structure and undeformed were collected in three distinct textural classes of soils (Ultisol, Cambisol, Entisol) in the 0-0.15 m layer. The S showed sensitivity to variations in the structure and texture of soils. By multivariate analysis it was observed that the S has a greater interaction with structural variables (porosity, aggregate stability, average diameter). We conclude that the S is an indicator of physical quality of the soil and condition reflects its structural soil.

Keywords: soil structure, soil texture, geometry porous.

1. INTRODUÇÃO

Para se definir qualidade do solo usualmente três aspectos são considerados: físico, químico e biológico. O entendimento dos aspectos físicos adequados para as plantas deve fundamentar-se nas complexas interações entre as propriedades do solo. Até mesmo a sazonalidade climática contribui para a complexidade do sistema: promovendo modificações na umidade do solo, na aeração, na condutividade hidráulica e na resistência à penetração.

A qualidade do solo não pode ser medida diretamente e dificilmente podemos defini-la e quantificá-la, mas ela pode ser inferida a partir de alguns indicadores. A busca por um valor numérico que exprima essa complexidade e que permita fazer predições do comportamento do solo, além de orientar na tomada de decisão, tem sido objeto de estudo na ciência do solo.

Para o caso do uso agrícola do solo, sabe-se que o seu comportamento é influenciado pela distribuição do tamanho das partículas minerais/orgânicas e pelos seus arranjos, pois estes parâmetros definem a sua estrutura e, por consequência, o seu espaço poroso e as propriedades do solo relativas à capacidade de armazenamento de água e aos fluxos hídricos e gasosos. Um índice que expresse as relações de causa e efeito entre textura/estrutura do solo, ou seja, as suas propriedades serão úteis na orientação do manejo agrícola.

O Índice “S” foi proposto para avaliação da qualidade do solo, sendo definido como a inclinação da reta tangente à curva de retenção de água no ponto de inflexão (Van Genuchten, 1980; Dexter, 2004). O ponto de inflexão da curva é a região que tem a maior probabilidade de haver um conteúdo de água mais adequado para o manejo, possibilitando prever as faixas de friabilidade e trabalhabilidade do solo. Assim, o valor do índice S é indicativo da qualidade estrutural, por meio do mesmo podemos inferir sobre a amplitude da distribuição do tamanho de poros no solo, expressando se há ou não condições físicas do solo adequadas para a produção agrícola.

A qualidade do solo tem relação direta com a sua funcionalidade nos ecossistemas, sejam naturais ou manejados, e significa a capacidade deste em manter a qualidade ambiental e proporcionar o crescimento e a saúde de plantas e animais.

O entendimento dos indicadores de qualidade do solo é útil na avaliação e/ou monitoramento das condições do solo, bem como na investigação das alterações dinâmicas do solo.

1.1 Hipótese

Solos com diferentes estruturas e texturas alteram o comportamento do parâmetro S.

1.2 Objetivo

Determinar quais os atributos físicos do solo estão mais relacionados com as alterações nos valores do índice S, para avaliar a sua eficiência e sensibilidade como indicador da qualidade física do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Qualidade do Solo

Larson e Pierce (1991) definiram qualidade do solo como a capacidade do solo funcionar dentro dos limites do ecossistema e interagindo positivamente com os ecossistemas circundantes. Em outras palavras, refere-se à capacidade do solo em produzir biomassa, funcionar como filtro de água, reciclar elementos e armazenar nutrientes para as plantas.

A qualidade do solo deve ser inferida a partir de medidas de características e propriedades do solo referidas como indicadores, portanto é indispensável que se faça validação de propriedades que possam ser usadas com esse propósito (MENDES *et al.*, 2006).

Segundo Islam e Weil (2000), a qualidade do solo não pode ser medida diretamente, por ser um estado funcional complexo, porém pode ser inferida a partir de determinadas propriedades do solo, as quais são chamadas de propriedades indicadoras da qualidade do solo. As compreensões destes indicadores de qualidade do solo estão direcionadas para avaliação e/ou monitoramento das condições do solo.

Stenberg (1999) enfatiza que nenhum indicador, individualmente, conseguirá descrever e quantificar todos os aspectos de qualidade do solo, pois deve haver relação entre todos os atributos do solo. Segundo Doran e Parkin (1994), um bom indicador deve integrar processos e propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Conforme Reichert *et al.* (2003), em física do solo, a qualidade está associada àquele solo que permite a infiltração e retenção de água e a disponibilidade para as plantas, responde ao manejo e resiste à degradação, permite a troca de calor e de gases entre a atmosfera e raízes de plantas, além de proporcionar o crescimento adequado das raízes.

A degradação do solo representa a redução da qualidade do solo. Este comportamento proporciona uma redução na produtividade, na capacidade do solo em manter sua funcionalidade física química e biológica, deixando de executar funções específicas de interesse ou utilidade para os seres humanos (LAL e SHUKLA, 2004).

Atualmente, a percepção de que a qualidade física do solo controla a resposta a aplicação de tecnologia nos sistemas agrícolas, motivou a pesquisa de parâmetros que permitam descrever as alterações dinâmicas no solo em diferentes escalas da organização estrutural do solo. Alguns indicadores da qualidade física e estrutural do solo têm sido utilizados, destacando-se a resistência tênsil dos agregados, a friabilidade do solo (DEXTER e KROESBERGEN, 1985; IMHOFF *et al.*, 2002), o intervalo hídrico menos limitante (IHML) (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1998) e mais recentemente o índice S (DEXTER, 2004a, b,c).

2.2. Textura

A textura do solo constitui-se numa das características físicas mais estáveis e representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais menores que 2 mm em diâmetro equivalente. A grande estabilidade faz com que a textura seja considerada característica de grande importância na descrição, identificação e, principalmente, classificação do solo (FERREIRA, 2010).

Solos arenosos, em geral, caracterizam-se por apresentar baixa capacidade de retenção de água e baixa capacidade de troca de cátions. A capacidade limitada dos

solos arenosos para estocar água, está relacionada com a baixa superfície específica das suas partículas e a formação pequeno volume de poros de retenção.

Segundo Fidalski *et al.* (2007), solos de textura arenosa conferem uma maior inclinação na curva de retenção de água do solo, implicando em um maior ângulo da reta tangente ao ponto de inflexão. Os solos de textura arenosa, segundo Dexter *et al.* (2008), apresentam uma acentuada distribuição de macroporos, podendo ocasionar maiores valores do índice S e não refletindo em suas propriedades físicas reais.

Dexter (2004a), estudando a relação entre S e o conteúdo de argila, verificou que os maiores valores de S ocorrem em solos com teores entre 30 e 50% de argila, podendo ser associado com o aumento do desenvolvimento da microestrutura.

2.3. Densidade do solo (ρ)

A densidade do solo se constitui uma das propriedades físicas mais estudadas para a caracterização e identificação dos efeitos dos sistemas de manejo (FIDALSKI *et al.*, 2007). Geralmente com o aprofundamento no perfil ocorre aumento na densidade do solo, pois as pressões exercidas pelas camadas superiores provocam o fenômeno de adensamento, reduzindo a porosidade. A movimentação do material fino dos horizontes superiores para os inferiores, por eluviação, também concorre para reduzir os espaços porosos e aumentar a densidade desses horizontes ou camadas (KIEHL, 1979).

A densidade do solo (ρ) é uma propriedade que reflete o arranjo das partículas do solo e estima o sistema de poros. Qualquer manifestação que possa influenciar na disposição das partículas no solo refletirá diretamente nos valores de ρ . Deste modo a presença da matéria orgânica que tem grande capacidade de agregação, é fundamental na estruturação das camadas superficiais do solo, concorrendo para elevar a porosidade dentro e entre agregados, com conseqüente valores mais baixos de ρ (FERREIRA, 2010).

A determinação da densidade do solo dos horizontes de um perfil permite algumas inferências em propriedades e atributos do solo como a drenagem, a porosidade, a condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar e à água, a capacidade de saturação, o volume de sedimentação e a erodibilidade (KIEHL, 1979); além da

retenção de água, da disponibilidade de água às plantas e da resistência do solo à penetração (TORMENA *et al.*, 1998).

Consensa *et al.* (2011) constaram que o índice S é afetado pela densidade do solo, de acordo com a composição granulométrica do solo, reduzindo seu valor em módulo com o aumento da densidade.

Oliveira *et al.* (2011), analisando a qualidade física do solo em cultivo de eucalipto constaram, que durante o processo de compactação do solo, a curva de retenção de água começa a apresentar redução na inclinação e, conseqüentemente, redução no valor do índice S. O que pode ser atribuído à diminuição na relação entre macroporosidade e microporosidade, que causa a diminuição dos teores de água em tensões mais baixas.

Para Tormena *et al.* (2008), o aumento da densidade do solo reduz drasticamente o volume de macroporos com uma conseqüente alteração na distribuição do tamanho de poros; comportamento semelhante foi encontrado por Dexter (2004 a), tendo um decréscimo no valor do S em função do aumento da densidade, para solos de clima temperado com diferentes classes texturais.

Araújo *et al.* (2004a) constataram que a densidade do solo influenciou de forma significativa e negativa a curva de retenção de água do solo, devido a sua influência na porosidade total e na distribuição de poros do solo. Em solos mais compactados, resultante do maior contato entre as partículas, há necessidade de maior umidade no solo para facilitar o deslocamento das partículas (SILVA *et al.*, 2002).

2.4. Matéria Orgânica

A matéria orgânica engloba os resíduos vegetais em estágios variados de decomposição, a biomassa microbiana, as raízes e a fração mais estável, denominada de húmus, que atuando de forma conjunta condicionam características e propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A principal característica física do solo afetada pela matéria orgânica é a agregação e a principal propriedade é a retenção de água. A partir de seu efeito na agregação, afeta indiretamente atributos do solo como a densidade do solo, a porosidade, a aeração, a curva de retenção de água e a infiltração de água no solo (SANTOS *et al.*, 2008).

A matéria orgânica tem a capacidade de atuar como agente ligante ou desagregante, dependendo de sua composição química e da presença de outros materiais cimentantes. A matéria orgânica tem papel preponderante na estrutura do solo e na estabilidade de agregados e é um dos fatores mais importantes na concessão de maior resistência à compactação (SILVA *et al.*, 2010).

Dexter (2004a) encontrou uma relação linear do valor de S com o aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS). Segundo Campos *et al.* (1995), o acúmulo de MOS condiciona menores teores de argila dispersa em água, maior agregação e, conseqüentemente uma maior porosidade total, que altera o formato da CRU, e essa alteração é detectada pelo índice S (STRECK *et al.*, 2008).

A correlação positiva entre MOS e umidade residual, demonstra a importância da matéria orgânica no solo para a retenção de água em elevados potenciais, uma vez que o mesmo resulta em maior superfície para adsorção de água e garante a manutenção da porosidade estrutural (MACHADO, 2006).

Olness e Archer (2005), estudando o efeito do carbono orgânico na disponibilidade de água no solo, verificaram que incrementos de 1% no teor de carbono orgânico do solo resultaram em aumentos de 2 a 5% na disponibilidade da água, dependendo da textura e do conteúdo de carbono orgânico inicial do solo.

2.5. Estrutura e Porosidade do Solo

Solos com mesma textura podem ter diferentes propriedades físicas porque as partículas do solo podem estar arrançadas de diferentes maneiras. Os arranjos das partículas primárias do solo unidas por agentes cimentantes proporcionam a formação de unidades denominadas agregados, que são as principais responsáveis pela formação da estrutura do solo (TROEH e THOMPSON, 2007).

Para Stengel (1990), os atributos funcionais da estrutura do solo são aqueles relacionados aos poros que governam o crescimento radicular e retenção de água; transmissão de água e de difusão gasosa. O espaço poroso é o aspecto mais importante da estrutura do solo, e inclui: (i) poros dentro dos agregados, são determinados pelas características granulométricas e estado de união das partículas elementares, sendo denominados poros texturais ou poros intra-agregados, e (ii) aqueles entre agregados e

que resultam de disposição dos elementos estruturais e são chamados de poros inter-agregados ou poros estruturais.

Segundo Dexter e Birkas (2004), o índice S diminui com o aumento da formação de agregados menores que 0,5 mm, observando que há um aumento no índice S com a redução no tamanho dos agregados formados pelo preparo do solo para plantio.

Os resultados obtidos por Watanabe *et al.* (2002) sugerem que o tamanho dos agregados entre 1 mm e 4 mm de diâmetro parecem ser os mais convenientes para o fluxo de água, desde que não existam baixa limitações de aeração. Estes autores concluíram que o diâmetro dos agregados menor que 0,5 mm ou maior que 8 mm podem limitar o desenvolvimento das culturas, por influenciar a capacidade de armazenamento de água do solo, a aeração e/ou a resistência mecânica à penetração das raízes.

Na avaliação da estrutura, procuram-se atributos que dimensionem a porosidade e a sua distribuição de poros por tamanho, assim como a implicação relativa à permeabilidade e à rigidez dos poros, em função da estabilidade das unidades sólidas que compõem a estrutura do solo (FERREIRA, 2010).

A presença de uma rede ideal de poros, com ampla variação de diâmetros, é um fator chave na fertilidade do solo, pois afeta as relações entre drenagem, teor de água disponível para plantas, absorção de nutrientes, penetração de raízes e temperatura do solo afetando a produtividade das culturas (HILLEL, 2004).

Os poros contêm ar, água, soluto e suportam a microbiota do solo. Portanto, é o espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 2004). A quantidade de espaços porosos disponível é usada como fator para avaliar a sustentabilidade do solo como meio para raízes das plantas (GROENEVELT *et al.*, 1984; TROEH e THOMPSON, 2007). A distribuição dos poros condiciona o comportamento físico-hídrico do solo, logo sua definição é necessária à quantificação desses processos do solo.

A relação entre macro e microporos, em parte, é responsável pela capacidade do solo em reter água e disponibilizá-las para as plantas. Além disso, a quantidade de macroporos influencia no crescimento das raízes, armazenamento de água e aeração do solo (BEUTLER e CENTURION, 2003).

Silva e 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 e implementos.

A compactação pode afetar a água disponível para as plantas, em função da diminuição da macroporosidade e aumento da microporosidade que provocam um aumento da tensão com que essa água está retida nos poros (STONE *et al.*, 2002).

A macroporosidade é uma medida diretamente relacionada com a difusão de oxigênio no solo, tendo a capacidade de transmitir gases por meio de seus poros favorecendo assim o crescimento das raízes. A macroporosidade determina a capacidade de aeração do solo (THOMASSON, 1978 e ERICKSON, 1982).

Referente ao desenvolvimento de plantas, os maiores prejuízos parecem estar relacionado às relações hídricas e de aeração do solo (IMHOFF *et al.*, 2002). Valores de macroporosidade abaixo de 10% são geralmente adotados como restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das plantas. No entanto, esses valores são apenas uma referência, pois a taxa de difusão gasosa no solo depende da profundidade e densidade do sistema radicular, da temperatura do solo e da tortuosidade do espaço poroso dentre outros (JONG VAN LIER, 2001).

A porosidade de aeração é a razão entre o volume de ar e o volume do solo, sendo, portanto, afetada pela umidade. Para um solo seco, toda porosidade é ocupado por ar. A exigência das plantas à aeração do solo compreende a porosidade livre de água necessária para o seu pleno desenvolvimento e varia entre espécies e solos (SOJKA, 1992).

A geometria e distribuição de poros por tamanho controlam a transmissão e armazenamento da água no solo, como também estabelecem a aeração e espaço adequado para o crescimento radicular (SILVA *et al.*, 2010). A diminuição da porosidade total provoca alteração na distribuição de diâmetro dos poros e nas suas propriedades hidráulicas (DEXTER *et al.*, 1985).

2.6. Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar)

A permeabilidade intrínseca do solo ao ar é um atributo inerente ao solo e reflete a influência conjunta das propriedades relacionadas ao espaço poroso (LIBARDI, 2005). O termo permeabilidade intrínseca foi introduzido por Kirkham (1946) como um termo quantitativo para descrever a permeabilidade em termos da estrutura do solo e é independente do fluído utilizado para suas medidas. A Kar é fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo. Ela alcança seu valor máximo em solos seco e progressivamente decresce à medida que o solo é umedecido até alcançar um valor de zero quando o solo está próximo ou na saturação

Segundo o trabalho de Watanabe *et al.* (2002), a disponibilidade de oxigênio às plantas é determinada pelas taxas de difusão de oxigênio, as quais diminuem progressivamente com a redução do espaço poroso ocupado com ar, além de depender da continuidade e tortuosidade dos macroporos.

Fatores como distribuição, continuidade, tortuosidade e forma dos poros, exercem influência direta no fluxo de ar no solo. A investigação da geometria de poros por meio da permeabilidade intrínseca do solo ao ar permite fornecer uma melhor compreensão da aeração, fluxo de água, crescimentos as raízes através dos poros do solo (ROSEBERG e MCCOY, 1990).

A permeabilidade intrínseca do solo ao ar é um atributo físico sensível aos efeitos dos sistemas de uso e manejo na estrutura do solo e pode fornecer uma descrição do estado de compactação do solo. O Kar é útil na caracterização do sistema de poros do solo, e o conhecimento de sua variação com o conteúdo de água no solo permite modelar a convecção do ar e transporte de gases (POULSEN *et al.*, 1999) . Segundo Silva *et al.* (2011) o conhecimento da quantidade de ar no solo depois de realizada diferentes práticas de cultivo pode auxiliar os agricultores e pesquisadores a planejar com eficiência as exigência de manejo para produção de uma dada cultura.

A importância da quantificação da permeabilidade do solo ao ar deve-se, por exemplo, à necessidade de se caracterizar o espaço poroso e de se identificar mudanças na estrutura do solo, ocasionadas pelas práticas de manejo (BLACKWELL *et al.*, 1990).

As medidas de Kar são fortemente dependentes da estrutura do solo (IVERSEN *et al.*, 2001), principalmente em relação ao tamanho e à continuidade dos

macroporos, justificando sua utilização na estimativa do espaço poroso que contribui para a transmissão de ar e água no solo. Aspectos funcionais da macroporosidade, bem como a continuidade e a tortuosidade dos poros, têm sido descritos por propriedades relacionadas ao fluxo de gases no solo (BALL, 1988; ROSEMBERG e MCCOY, 1990).

2.7. Curva de Retenção de Água (CRA)

Dentre os atributos físicos do solo diretamente ligados ao crescimento das plantas destacam-se a retenção e a disponibilidade de água no solo. Considerando que diferentes solos retêm diferentes conteúdos de água, em um dado potencial, é necessário utilizar o conceito do potencial com que a água está retida no solo para definir os limites de disponibilidade de água para as culturas (SILVA *et al.*, 2010).

O solo, reservatório de água para as plantas, é afetado pelo manejo e por práticas culturais, que findam por alterar a dinâmica e retenção de água nos poros. Os fatores que afetam a disponibilidade de água às culturas são: a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas e, por consequência, a distribuição do diâmetro dos poros; a textura, o tipo e quantidade de argila e o teor de matéria orgânica. A interação entre esses fatores é bastante complexa e muito difícil de ser prevista. Nesse contexto, o estudo da distribuição do diâmetro dos poros do solo assume grande importância na relação solo: água (KLEIN e LIBARDI, 2000).

Em solos arenosos pequenos incrementos de tensão provocam redução considerável no teor de água. A explicação para isto reside na grande quantidade de macroporos que esses solos apresentam. Por outro lado, os solos argilosos apresentam uma distribuição mais uniforme dos poros, imprimindo maior capacidade de retenção de água no solo e um decréscimo gradual da água retida com aumentos gradativos de tensões (AMARO FILHO *et al.*, 2008).

Para Silva *et al.* (2010), a CRA descreve a habilidade do solo em armazenar água em diferentes tensões. A CRA é uma das principais propriedades físicas do solo e expressa a relação entre a energia com que a água está retida (potencial matricial, Ψ_m), e o conteúdo de água no solo (θ). Na medida em que se aumenta a tensão a água retida nos poros menores diminui, reduzindo assim o teor de água no solo.

O modelo de ajuste de Van Genuchten (1980) (Eq.1) que inclui parâmetros relacionados com o formato da curva, contendo um escalonador Ψ_m

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

em que: θ_r é a umidade residual; θ_s é a umidade de saturação; α é o escalonador da tensão; n e m (parâmetros relacionados ao formato da curva); Ψ_m (tensão aplicada).

A dinâmica da água no solo é dependente das características do solo (textura, estrutura, tipo de argilas, matéria orgânica), de fatores externos (cobertura do solo, densidade de plantas, profundidade do lençol freático, precipitação, temperatura) e da relação solo-planta-atmosfera. O conhecimento das propriedades físico-hídricas do solo é fundamental para o entendimento do processo dinâmico do movimento de água e de soluto no solo.

Segundo Dexter *et al.* (2008) por meio da equação de van Genuchten (1980) consegue-se integrar, na curva de retenção de água, fatores importantes como a retenção de água e a distribuição de tamanho de poros, gerando valores interpretativos como o índice S que se relaciona com várias propriedades físicas do solo. Os trabalhos disponíveis na literatura que utilizam a curva retenção de água (CRA) mostram que a melhoria ou a degradação física do solo conduz, via de regra, a uma mudança no formato das curvas.

Tormena *et al.* (2004), estudando as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, após dez anos sob dois sistemas de manejo: plantio direto e plantio direto + escarificação, não observaram diferenças na retenção de água no potencial de -1,5 MPa, provavelmente pela similaridade dos valores de densidade e dos teores de carbono orgânico do solo. Em potenciais maiores que - 0,008 MPa ocorreram diferenças entre os sistemas estudados, demonstrando a influência destes na distribuição de poros de maior diâmetro.

2.8. Índice S

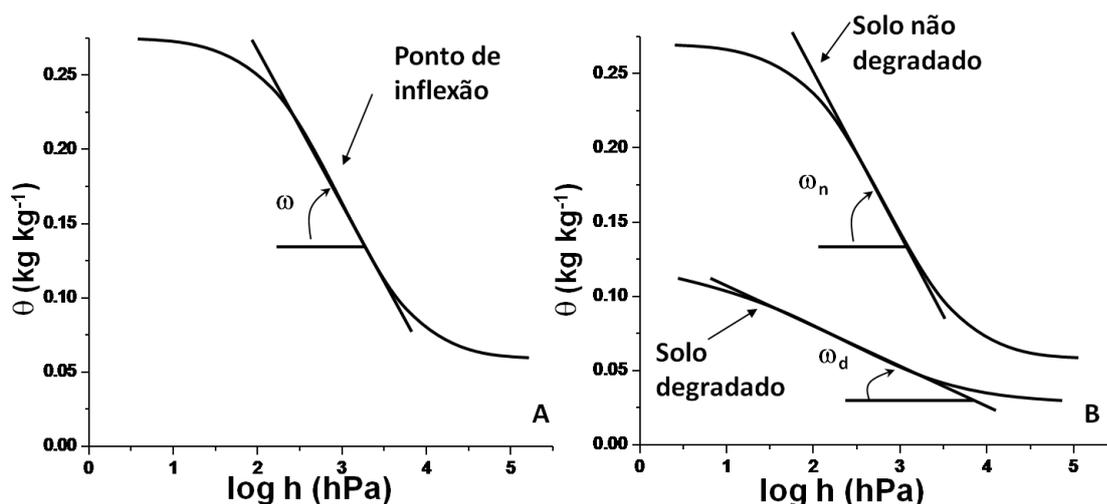
Segundo Dexter (2004 a, b, c), o índice S é definido como valor absoluto da inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo teor gravimétrico de água versus o ln do potencial matricial (Figura 1). O parâmetro S é caracterizado como sendo os valores obtidos em cada eixo para a segunda derivada da curva de retenção de água igualada a zero (SILVA *et al.*, 2010).

O índice S proposto por Dexter (2004 a, b, c) é considerado indicador de qualidade física e tem sido relacionado com muitas propriedades do solo, além de expressar direta ou indireta do volume e /ou função do espaço poroso do solo.

A textura é a distribuição das partículas minerais primárias do solo, diferentes texturas dão origem a arranjos porosos diferentes. No entanto, informações precisas sobre a distribuição de tamanho dos poros não pode ser obtida com os dados da curva de retenção de água do solo por causa dos efeitos da conectividade entre os poros. Um maior valor do índice S indica que parte da porosidade é composta por uma faixa mais estreita de tamanho de poros (DEXTER, 2004a). A presença de poros estruturais exerce uma maior influência no parâmetro S, uma vez que são mais sensíveis a fatores externos e são essenciais para uma boa qualidade do solo (DEXTER *et al.*, 1985).

Segundo Dexter (2004b), as argilas desempenham um papel importante no controle das propriedades físicas do solo. No entanto, as partículas de argilas quando dispersas em água provocam instabilidade no solo, pois impedem a formação de arranjos estruturais estáveis, resultando numa massa homogênea dispersa.

Figura. 1. (A) Curva de retenção de água no solo mostrando o ponto de inflexão e a inclinação ($\tan \omega$) da curva e ponto de inflexão. (B) A curva de retenção de água no mesmo solo submetido às duas diferentes densidades. Fonte Dexter (2004a)



O índice S está fortemente correlacionado com os valores estimados da condutividade hidráulica do solo não saturado. O motivo é que ambos dependem da estrutura do solo que constitui a base comum para a maioria dos estudos dos atributos físicos (DEXTER, 2004c).

Segundo Dexter (2004a) é mais conveniente ajustar a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão a partir dos parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980), nesse caso o valor de S é sempre negativo, sendo conveniente usar o módulo nas discussões.

Para a obtenção do valor do índice S utilizou-se o modelo de ajuste de van Genuchten (1980):

$$U = U_r + \frac{(U_s - U_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad \text{Eq. (2)}$$

A curva de retenção em plotada para o $\text{Log}(h)$ em função U ($g\ g^{-1}$), pode-se escrever:

$$\frac{dU}{d \ln(h)} = \frac{dU}{dh} \cdot \frac{dh}{d \ln(h)} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde o $\ln(h)$ é o logaritmo natural de h , portanto:

$$\frac{dU}{d \ln(h)} = -m \cdot n \cdot (U_{\text{sat}} - U_{\text{res}}) \alpha^n h^n [1 + (\alpha h^n)]^{-m-1} \quad \text{Eq. (4)}$$

O módulo do potencial de água no ponto de inflexão pode ser descrita na eq 5:

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

O “slope” (S), no ponto de inflexão é obtido substituindo na Eq. 5 dentro da Eq. 4 .

$$S = -n (U_{\text{sat}} - U_{\text{res}}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad \text{Eq. (6)}$$

O cálculo para determinar o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água é realizado pela utilização da eq. 7:

$$U_i = (U_{sat} - U_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + U_{res} \quad \text{Eq. (7)}$$

Dexter (2004 a, b, c), com base na sua experiência prática, sugere categorias descritivas da qualidade física do solo, em termos dos valores correspondentes de S:

$S > 0,050$ (muito boa)

$0,050 > S > 0,035$ (boa)

$0,035 > S > 0,020$ (pobre)

$0,020 > S$ (muito pobre)

A partir dos dados publicados por Dexter (2004a), através de funções de pedotransferência, mostrou que o crescimento de raízes não ocorria quando valores de $S < 0,020$ e que poucas raízes cresceriam entre $0,020 < S < 0,035$. Por outro lado, para valores $S > 0,035$, o crescimento de raízes é favorecido. Esses valores críticos do índice S são sugeridos por Dexter (2004a): um valor do índice $S > 0,035$ é estabelecido como limite para indicar condições físicas favoráveis para o crescimento das raízes; valores $0,020 < S < 0,035$ são considerados pouco favoráveis (pouco crescimento de raízes) e $S < 0,020$ são considerados altamente restritivos (nenhum crescimento radicular).

Tormena *et al.* (2008) avaliaram o índice S em diferentes sistemas de preparo do solo e encontram um menor valor deste índice para o sistema de plantio direto em comparação ao sistema de plantio convencional, independentemente das posições de amostragem (linha e entrelinha), além disso o valor de S diminuiu com o aumento da densidade do solo devido ao efeito da compactação do solo o qual reduziu drasticamente o volume de macroporos, alterando a distribuição de tamanho de poros e consequentemente sua qualidade física.

Silva *et al.* (2008) mostraram que uma área de mata nativa apresentou melhor qualidade física do solo determinada pelo índice S em relação às áreas de plantio direto, uma vez que o tráfego de máquinas é reduzido em relação ao plantio convencional, indicando uma melhor configuração porosa e menor restrição física ao crescimento de raízes seja por aeração, retenção d água ou restrição mecânica. Marchão *et al.* (2007) verificaram que o índice S variou em função do sistema de integração lavoura pecuária

e da profundidade de amostragem, demonstrando ser um índice sensível às alterações na estrutura do solo.

Avaliando o índice S como indicador de qualidade física de um solo submetido a sistema de preparo convencional e ao sistema de plantio direto, Pereira *et al.* (2011), observaram que não houve diferença entre os sistemas de manejo estudados. A redução do valor do índice S nas áreas de preparo convencional pode estar associada à diminuição da distribuição de poros, provocado “achatamento” que reduziu os poros estruturais.

Segundo Dexter (2004a), a textura, a densidade do solo e o teor de matéria orgânica afetam o índice S. Dexter (2004b) observou que a friabilidade do solo e o preparo plantio direto influenciam nos valores do índice S, apresentando valores superiores a 0,035.

Andrade e Stone (2009), estudando a qualidade física do solo por meio do índice S, concluíram que ele correlacionou-se com a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade, mostrando tratar-se de um indicador adequado da qualidade física de solos de Cerrado. O valor encontrado como adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado foi de $S = 0,045$, enquanto que valores de $S \leq 0,025$ indicam solos degradados fisicamente.

Comparando sistemas de cultivo com e sem rotação de culturas, Machado (2006) verificou que o valor de S ficou abaixo ao de boa qualidade física do solo ($S=0,035$). Estes valores refletem os limites críticos de propriedades como porosidade total, macroporosidade e densidade do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da Área de coleta:

Para o estudo foram selecionados três solos de diferentes classes texturais e as amostras coletadas foram na camada de 0 - 0,15 m. O primeiro solo localiza-se no município de Limoeiro do Norte, na Chapada do Apodi, de acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo BSw'h', caracterizado por ser muito quente e semiárido. A temperatura média anual é de 28,5° C, com mínima de 22° C e máxima de 35°C. A precipitação média anual é 772 mm, registrando-se uma distribuição de chuvas muito irregular ao longo do ano e a umidade relativa média anual de 62% (DNOCS, 2011).

O solo classificado como Cambissolo Háplico (SEPLAG/IPECE, 2009) foi coletado nas coordenadas latitude 5°08'04"S e longitude 37°54'48" (Figura 1), na comunidade Lagoa da Casca, na Chapada do Apodi – CE. A área encontrava-se sob cultivo de abacaxi (*Ananas comosus L. Merrill*), variedade Pérola, há 8 anos (Figura 3b). O sistema de irrigação da área era pressurizado (gotejamento), a adubação era feita via fertirrigação era aplicado sulfato de magnésio, ureia, sulfato de potássio e composto orgânico incorporado na área de plantio.

Figura 2. Localização da área de coleta do Cambissolo Háplico.

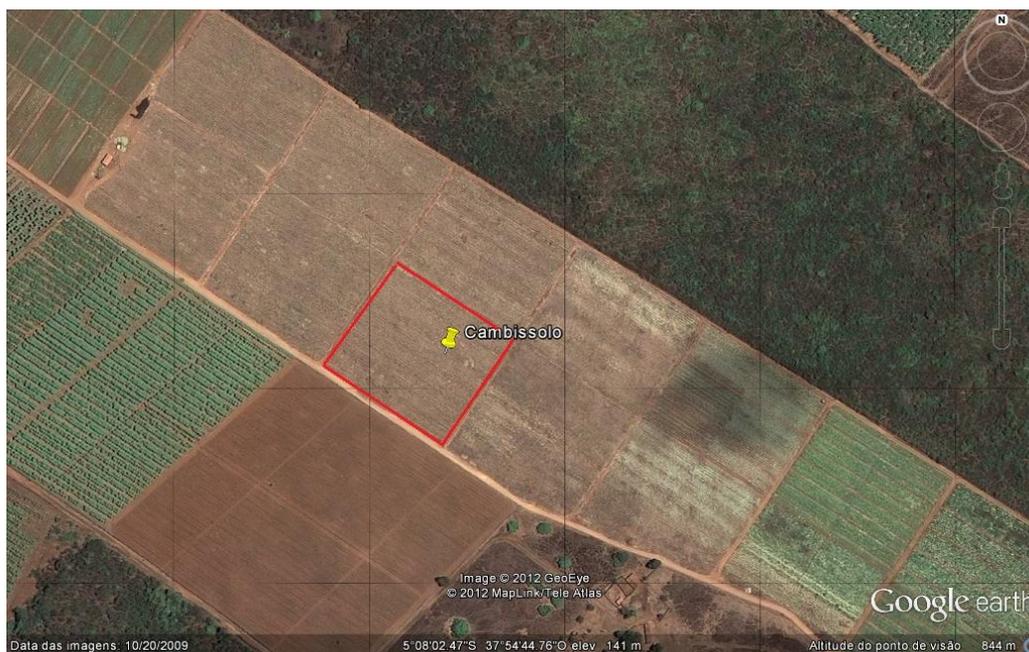
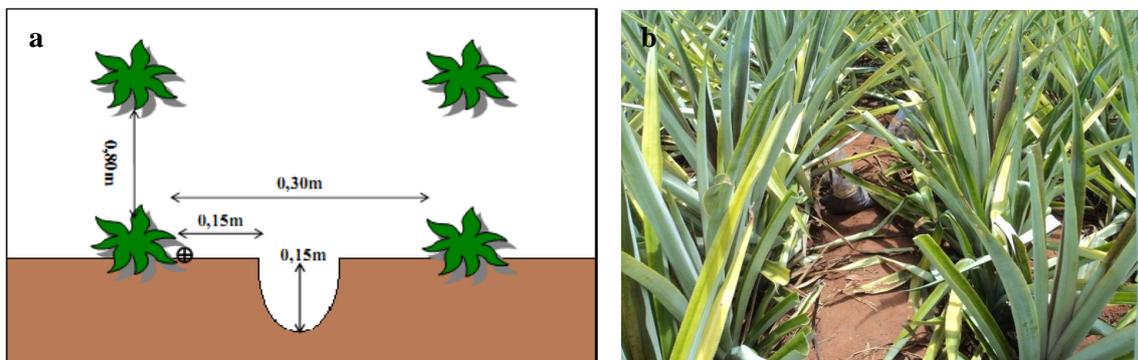


Figura 3. a) Esquema do processo de coleta do Cambissolo Háplico, o abacaxi (*Ananas comosus* L. Merrill) com espaçamento 0,80 x 0,30 m e a coleta a 0,15 m do sistema de irrigação (⊕); b) Local da coleta do solo.



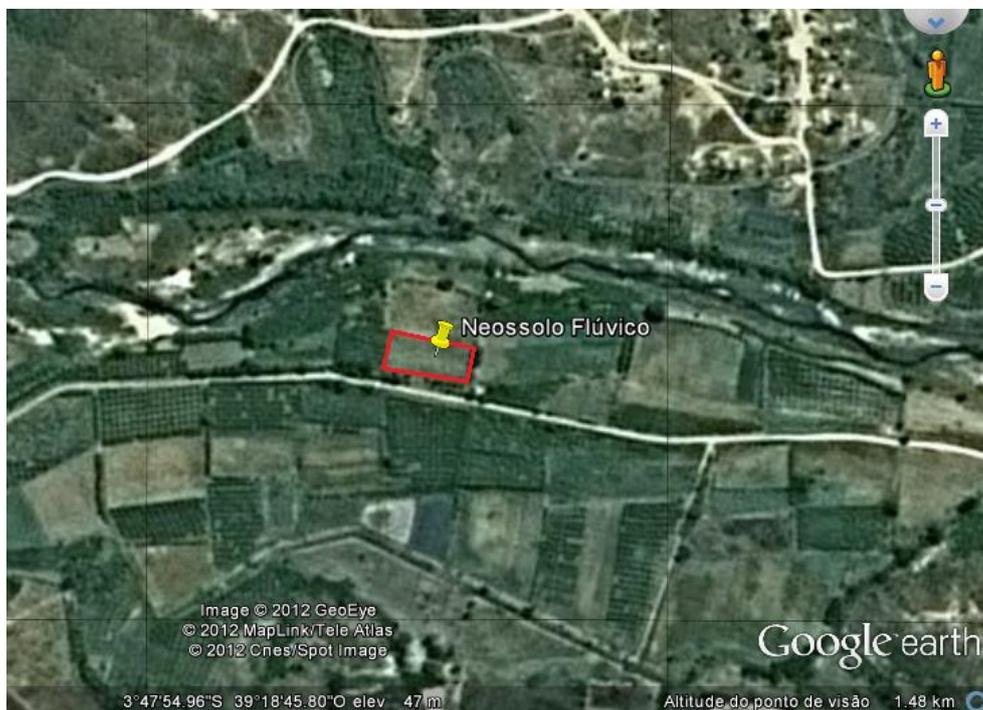
O segundo solo foi classificado como um Argissolo Vermelho (FUNCEME, 2011), coletado na Fazenda Normal da EMATERCE, no município de Quixeramobim-CE, a uma latitude de 5°07'22.94" S e longitude de 39°11'01.01" O (Figura 4). O clima é classificado como BShw' (clima típico de semiárido) conforme a classificação de Köppen (MILLER, 1971).

Figura 4. Localização da Fazenda Normal (EMATERCE), área de coleta do Argissolo Vermelho (Fonte. FUNCEME, 2011)



O terceiro solo corresponde ao Neossolo Flúvico (EMBRAPA, 1999), localizado a latitude $3^{\circ}48'49.1''\text{S}$ e longitude $39^{\circ}20'17.8''\text{O}$ (Figura 5). Esta área pertence à Fazenda Experimental Vale do Curu - FEVC, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, no Município de Pentecoste, Ceará. A classificação climática da região segundo Köppen é do tipo Aw' (clima é tropical quente semi-árido). A temperatura média anual varia de 22°C a 28°C . Apresenta umidade relativa do ar média de 74% ao longo do ano e a precipitação média anual varia de 600 mm a 1.100 mm (BRASIL, 2001).

Figura 5. Localização da Fazenda Experimental Vale do Curu, área de coleta do Neossolo Flúvico



Foram realizadas análises de alguns atributos físicos (Tabelas 1 e 2) e químicos dos solos estudados (Tabelas 3 e 4).

Tabela 1. Composição granulométrica e classificação textural dos solos na profundidade de 0-0,15m.

Solos	Areia	Silte	Argila	ADA	GF	Classificação textural
	g/kg ⁻¹			%		
Argissolo Vermelho	729,00	134,00	137,00	74,00	46,80	Franco-arenoso
Cambissolo Háptico	488,00	246,5	265,5	194,10	26,90	Franco argilo-arenoso
Neossolo Flúvico	143,00	495,00	362,00	227,40	37,30	Franco argilo-siltoso

Tabela 2. Distribuição da fração areia nos solos estudados na profundidade de 0-0,15 m.

Solos	Diâmetro da Malha (mm)				
	AMG	AG	AM	AF	AMF
	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,105	0,105 - 0,053
	%				
Argissolo Vermelho	9,70	20,5	21,00	35,00	14,00
Cambissolo Háptico	16,6	17,00	20,00	32,00	14,00
Neossolo Flúvico	1,30	2,20	4,40	34,30	57,70

* AMG= Areia muito grossa; AG= Areia Grossa; AM= Areia média; AF= Areia fina; AMF= Areia muito fina.

Tabela 3. Atributos químicos relacionados aos solos estudados na profundidade de 0-0,15 m.

Solos	Ca ⁺²	Ca ⁺² +Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Al ⁺³
	cmolc kg ⁻¹					
Argissolo Vermelho	1,83	2,96	0,327	0,254	2,05	0
Cambissolo Háptico	6,11	8,34	0,929	0,558	1,58	0
Neossolo Flúvico	11,0	16,5	1,212	0,568	4,79	0

Tabela 4. Atributos químicos relacionados aos solos estudados na profundidade de 0-0,15 m.

Solos	S	CTC	PSS	V	pH	CE
	cmolc kg ⁻¹		%		ds m ⁻¹	
Argissolo Vermelho	3,54	5,60	5,83	63,21	5,7	5,8
Cambissolo Háptico	9,82	11,40	8,02	86,11	7,1	6,3
Neossolo Flúvico	18,28	23,07	5,32	80,00	5,8	6,7

3.2. Amostragem:

As amostras de solo com estrutura indeformada foram coletadas com o amostrador tipo Uhland, o qual é equipado com anéis de aço com as seguintes dimensões: 3 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Foram coletados solos de três classes: Cambissolo Háplico, Argissolo Vermelho e Neossolo Flúvico com caráter sódico. Para cada solo foram coletadas sete amostras a uma profundidade de 0–0,15 m.

Figura 6. Amostrador tipo Uhland.



3.3. Análises Laboratoriais:

3.3.1. Atributos Físicos:

3.3.1.1. Análise Granulométrica:

Utilizou-se o método da pipeta, que consiste em determinar a quantidade de argila, silte e areia da amostra de solo (GEE e BAUDER, 1986). Utilizando o dispersante hidróxido de sódio 1N nas amostras, 20 g TFSA, e água destilada. A dispersão física foi realizada durante 10 minutos. As areias foram separadas em peneira de malha 0,053 mm de diâmetro. O silte e argila foram separados por sedimentação, conforme a Lei de Stokes

3.3.1.2. Argila dispersa em água

Foi adotado o mesmo método para a análise granulométrica (GEE e BAUDER, 1986), porém sem o uso do dispersante químico e as areias foram descartadas.

Grau de flocculação

Foi obtido com base na equação (8):

$$GF = \left(\frac{\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}}{\text{argila total}} \right) \quad \text{Eq. (8)}$$

3.3.1.3. Densidade do solo (ρ)

Método do anel volumétrico

Amostras de estrutura indeformada foram coletadas com amostrador tipo Uhland, com cilindro interno de 50 m³, em seguida foram secas em estufa até peso constante calculado conforme a equação 9 (BLAKE e HARTGE, 1986a).

Cálculo:

$$\text{Densidade solo (Mg/m}^3\text{)} = a/b \quad \text{Eq. (9)}$$

a = Massa da amostra seca a 105 °C

b = Volume da amostra

3.3.1.4. Densidade de Partículas (ρ_s)

Determinada pelo método do balão volumétrico, em balão de 50 ml contendo 20g de terra fina seca ao ar, calculado conforme equação 10 (BLAKE e HARTGE, 1986b).

Cálculos:

$$\text{Densidade de partículas } (\rho_s) = \frac{\text{Massa de solo seco entre } 105^\circ \text{ C e } 110^\circ \text{ C}}{(50 - \text{volume de álcool gasto})} \quad \text{Eq. (10)}$$

3.3.1.5. Porosidade total (α)

A porosidade foi calculada pela equação 11; conforme Danielson e Sutherland (1986).

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad \text{Eq. (11)}$$

3.3.1.6. Microporosidade

A microporosidade foi determinada em mesa de tensão, pela aplicação de tensão correspondente a 6 kPa sobre as amostras até a obtenção de equilíbrio indicado pelo fim da drenagem (DANIELSON e SUTHERLAND, 1986).

3.3.1.7. Macroporosidade

Calculada por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.3.1.8. Estabilidade de Agregados e Diâmetro Médio Ponderado:

Adotou-se o método de tamisação por via úmida para a estabilidade dos agregados (KREMPER e ROSENAU, 1986), estabelecendo-se cinco classes de tamanho de agregados estáveis (4,76-2,00 mm; 2,00-1,00 mm; 1,00-0,50 mm; 0,50-0,25 mm; < 0,25 mm).

O teor de agregados estáveis por classes de diâmetro, conforme a equação (12): A partir dos dados obtidos, foi calculado o índice diâmetro médio ponderado (DMP) por meio da equação (13)

$$\% \text{ de agregados estáveis na amostra} = \left[\frac{(M_a - M_p)}{(M_s - M_w - \Sigma M_p)} \right] \cdot 100 \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que:

M_a = massa dos agregados aparentes;

M_p = massa das partículas primárias;

M_s = massa da amostra original antes da tamisação;

M_w = massa de água na amostra original

O diâmetro médio ponderado (DMP) foi calculado pela seguinte fórmula, introduzido por Van Bavel (1949):

$$DMP = \sum_{i=1}^N X_i \cdot W_i \quad \text{Eq. (13)}$$

Em que: W_i é a proporção, em peso dos agregados de tamanho i e X_i é o diâmetro médio dos agregados da classe de tamanho i .

A percentagem de agregados estáveis na amostra foi determinada considerando a equação (14):

$$\% \text{ de agregados estáveis na amostra} = \left[\frac{(M_a - M_p)}{(M_s - M_w - M_p)} \right] \cdot 100 \quad \text{Eq. (14)}$$

Em que:

M_a = massa dos agregados aparentes;

M_p = massa das partículas primárias;

M_s = massa da amostra original antes da tamisagem;

M_w = massa de água na amostra original.

3.3.1.9. Curva de Retenção de Água (CRA)

A curva de retenção de água no solo foi feita aplicando-se as seguintes tensões (2, 4, 6, 8 e 10 kPa) em mesa de tensão (Figura 7a) e (33, 100 e 1500 kPa) em câmara de pressão de Richards (Figura 7b). O ajuste foi realizado pelo modelo matemático de Van Genuchten (1980) descrito na equação (1), para a obtenção dos parâmetros foi utilizado o software Soil Water Retention Curve (version 3.00 beta) (SWRC), adotou-se a não restrição para $m = 1 - 1/n$ no ajuste do modelo aos dados (Dourado Neto et al., 1995), porém foi fixado o U_{sat} (umidade na saturação) e U_{res} (umidade residual).

A câmara de Richards consiste, basicamente, de uma câmara construída para suportar alta pressão, com uma placa de cerâmica porosa no seu interior. As amostras são colocadas na superfície da placa de cerâmica, as quais, juntamente com a placa, são saturadas com água, de preferência destilada, por 24 horas. Em seguida o conjunto é colocado no interior da câmara e a pressão de ar é introduzida. Isto faz com que a solução se mova do solo para o pequeno reservatório sob a placa, gotejando no tubo de saída até que, depois de certo tempo, pára, atingindo, portanto a condição de equilíbrio. (Libardi, 2005).

Figura 7. a) Mesa de Tensão; b) Câmara de pressão de Richards

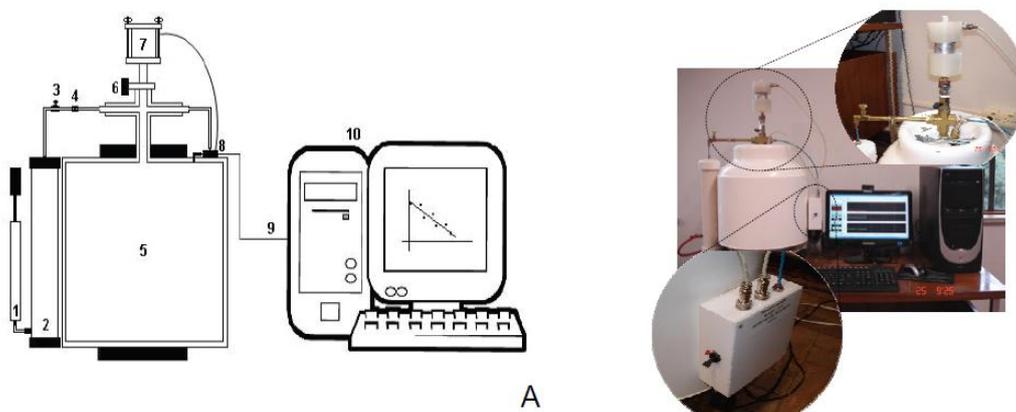


3.3.1.10. Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

Para a determinação do movimento do ar no solo foi utilizada a metodologia de Kirkham (1946), com amostras de estrutura indeformada para a medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. Na medida em que o ar flui pela amostra, o decréscimo da pressão no reservatório é registrado pelo sistema de aquisição de dados pelo manômetro digital. À medida que o ar atravessa a amostra, é gerado um decréscimo logarítmico da pressão interna do reservatório, que é medido em intervalos variáveis de tempo. (Figura 8) (SILVA et al., 2009). Para a aquisição dos dados foi utilizado o modelo eletrônico e computacional *Permeair v 1.0* desenvolvido pelo Laboratório de Eletrônica e Física do Solo Departamento de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Esalq/USP, conforme Brito (2010). O coeficiente de permeabilidade ao ar (K_a) foi determinado conforme equação (11).

As análises de permeabilidade do solo ao ar foram realizadas na tensão de 10 kPa.

Figura 8. Diagrama esquemático (A) constituído por: 1- bomba de ar; 2- cilindro de desumificação do ar preenchido com sílica gel; 3- válvula de controle de fluxo; 4- válvula de escape para ajuste da pressão interna; 5- cilindro de ar; 6- válvula de controle de fluxo; 7- compartimento de alocação da amostra de estrutura indeformada de solo; 8- sistema de aquisição de dados constituído por transdutor de pressão e sensores de temperatura e umidade; 9- cabo de transmissão de dados (DB 9); 10- microcomputador para processamento de dados; e fotografia do equipamento para medida da permeabilidade do solo ao ar (B) (BRITO (2010)).



O valor de permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a) = 10^{-12} m² foi sugerido como limite crítico por McQueen e Shepherd (2002), e valores abaixo desse limite podem dificultar o crescimento das plantas.

Uma vez que a permeabilidade do solo ao ar é uma propriedade que representa a qualidade do espaço poroso quanto ao processo de fluxo de ar, os solos que apresentam alta permeabilidade têm maior capacidade de realizar trocas gasosas, ou seja, possuem uma melhor aeração. A permeabilidade do solo ao ar não influenciará a difusão de gases quando a porosidade de aeração for maior que 10%. Os dados foram ajustados por meio coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}) a partir da equação (15):

$$k_{ar} = \frac{2,30 L \eta V}{A P_{atm}} \times |S| \quad \text{Eq. (15)}$$

Em que:

- k_{ar} (coeficiente de permeabilidade ao ar (m²));
- V (volume de ar que passa pela amostra (m³));
- η (viscosidade dinâmica do ar (Pa.s));
- L (altura do anel volumétrico (m));
- A (secção transversal da amostra de solo (m²));
- P_{atm} (pressão atmosférica (Pa));
- S (coeficiente angular da regressão linear da pressão em função do tempo).

3.3.1.11. Índice “S”

Para determinar o índice S foi utilizada a curva de retenção de água no solo. A umidade foi ajustada por meio do modelo matemático de van Genuchten (1980), e pelo mesmo foi obtido os parâmetros de inclinação no ponto de inflexão (índice S) por meio da eq.(6) e determinação da umidade no ponto de inclinação eq. (7).

3.3.2. *Atributos Químicos:*

3.3.2.1. *Carbono Orgânico*

O carbono orgânico foi quantificado por oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio $K_2Cr_2O_7$ em meio sulfúrico com aquecimento externo, e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal (EMBRAPA, 1997).

A percentagem de matéria orgânica foi calculada multiplicando-se o resultado de carbono orgânico por 1, 724 de acordo com equação (16).

$$\text{Matéria Orgânica (g kg}^{-1}\text{)} = C \text{ (g/kg)} \times 1, 724 \quad \text{Eq. (16)}$$

3.3.2.2. *Capacidade de Troca de Cátions e Bases Trocáveis*

3.3.2.2.1. *Determinação de Cálcio e Magnésio Trocável*

A determinação de cálcio e magnésio foi por meio da extração com KCl 1N e determinação titulação (EMBRAPA, 1997).

3.3.2.2.2. *Determinação do Cálcio Trocável*

A determinação de cálcio foi por meio da extração com KCl 1N e determinação titulação (EMBRAPA, 1997).

3.3.2.2.3. *Determinação do Potássio trocável*

A determinação potássio foi por meio da extração com solução diluída de ácido clorídrico e posterior determinação por espectrofotometria de chama (EMBRAPA, 1997).

3.3.2.2.4. *Determinação Sódio Trocável*

A determinação de sódio foi por meio da extração com solução diluída de ácido clorídrico e posterior determinação com espectrofotometria de chama (EMBRAPA, 1997).

3.3.2.2.5. *Valor T (Capacidade de Troca de Cátions) – CTC*

A capacidade de troca de cátions foi calculada com base na equação (17). (EMBRAPA, 1997).

$$T \text{ (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = S + (H + Al^{+3}) \quad \text{Eq. (17)}$$

3.3.2.2.6. *Percentagem de Saturação com Sódio (PSS)*

A percentagem de saturação de sódio foi calculada com base na equação (18). (EMBRAPA, 1997).

$$PSS = Na^+ / T \quad \text{Eq. (18)}$$

3.4. Análise estatística

Os dados do experimento foram analisados em delineamento inteiramente casualizado, em que se adotou o esquema fatorial 3x1x7 (três solos (Argissolo Vermelho, Cambissolo Háptico, Neossolo Flúvico); uma profundidade (0 – 0,15m); e sete repetições. Na análise estatística foi aplicado o Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para verificar a normalidade dos dados a partir do *software* Assistat 7.6 beta, o F para a análise de variância e o de Tukey para a comparação de médias a 5% de probabilidade.

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva clássica. Este procedimento foi aplicado para verificar a existência de valores periféricos (“outliers”) que comprometessem o comportamento médio dos parâmetros avaliados. As análises de correlação e regressão foram utilizadas para verificar relações entre o índice S com os demais atributos.

Para uma melhor interpretação dos dados utilizou-se a estatística multivariada, que contribuiu para o entendimento das interações entre variáveis e a influência de cada variável sobre o índice S. Na análise dos componentes principais, foram utilizadas 15 variáveis: Areia, Silte, Argila, Grau de floculação (GF), Densidade do solo (Ds), Densidade de partículas (Dp), Estabilidade de agregados (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Porosidade total (Pt), Macroporosidade (Pma), Microporosidade (Pmi), Índice S (S), Permeabilidade do solo ao ar (kar), Matéria orgânica (M.O) e Porcentagem de sódio total (PST). Os atributos selecionados apresentaram correlação de no mínimo 0,6 em módulo, em pelo menos um dos componentes principais e, por este motivo, no Argissolo Vermelho atributos silte e matéria orgânica (M.O), no Neossolo Flúvico atributos como densidade de partículas (Dp), microporosidade (Pmi) e matéria orgânica (M.O) foram excluído por não atingirem o valor mínimo selecionado.

A análise de agrupamento foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre os acessos na identificação dos agrupamentos para um conjunto de 15 variáveis. Para a análise de agrupamento das variáveis utilizou-se o método de Ward, com a medida euclidiana para a distância entre os casos nos grupos. O resultado da análise foi apresentado na forma gráfica (dendrograma).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Índice S

A curva de retenção de água (CRA) no solo é uma função entre o conteúdo de água retido e o potencial com que a água está retida, sendo afetada pela composição granulométrica e condição estrutural do solo principalmente a distribuição de tamanho dos poros. O índice S se baseia no ponto de inflexão da CRA, em que ocorre a máxima drenagem de água e aeração do solo em condições de campo, local no qual há uma maior probabilidade de encontrar o conteúdo de água ideal (capacidade de campo) para a realização das práticas agrícolas.

O comportamento apresentados pelos solos (Gráfico 1) estão relacionados com a influência da densidade do solo, composição granulométrica, porosidade total (macroporos e microporos), matéria orgânica e porcentagem de saturação de sódio (PSS).

A densidade do solo (ρ) é um atributo que influencia o formato da CRA, promovendo a redução do espaço poroso, principalmente dos macroporos, o que afeta as propriedades físico-hídricas. Os valores de ρ observados no Argissolo Vermelho está relacionada com a textura arenosa do solo, comportamento semelhantes ao encontrados por Reinert *et al.* (2006) para esta classe de textural. Verifica-se que solo no Cambissolo Háplico ($1,49 \text{ Mg cm}^{-3}$) e Neossolo Flúvico ($1,40 \text{ Mg cm}^{-3}$) que apresentaram textura mais argilosa, os valores de ρ não apresentaram diferença significativa, estes resultados corroboram com Kiehl (1979) e Torres *et al.* (1999).

As faixas de valores de densidade do solo considerado adequados para o desenvolvimento das culturas variam de acordo com a composição granulométrica. Reichert *et al.* (2003) estimam valores críticos para solos de textura franco-argiloso varia de $1,40 - 1,50 \text{ Mg cm}^{-3}$; para solos de textura franco arenosa $1,70 - 1,80 \text{ Mg cm}^{-3}$ enquanto Reynolds *et al.* (2007) sugerem que para solos argilosos $0,9 - 1,20 \text{ Mg cm}^{-3}$.

A influência da densidade do solo na CRA foi mais evidente no Neossolo Flúvico, isto indica que as alterações na porosidade provocadas pelo aumento da densidade foram mais acentuadas na porosidade relacionada com o movimento rápido

da água no solo do que em relação à retenção de água, comportamento que pode ser observado no gráfico 1.

O teor de silte (Tabela 1) e areia da fração muito fina (Tabela 2) no Neossolo Flúvico afetaram a capacidade de retenção de água. A baixa atividade química dificulta o processo de adsorção; e a faixa de tamanho (silte (0,053 – 0,002 mm) e areia muito fina (0,105-0,053 mm)) faz com que sejam facilmente translocado e depositado nos poros do solo obstruindo o fluxo de água evitando a percolação favorecendo a retenção de água (Gráfico 1).

Segundo Dexter (2004 a), Mbagwu (1993), Grohman et al. (1962) e Silva & Kay (1997), observaram uma correlação positiva entre o teor de argila e a retenção de água do solo. Sabe-se que a argila aumenta a área de superfície específica da matriz do solo, e conseqüentemente a absorção de água (Hillel, 1998), a elevada microagregação presente no Neossolo Flúvico favoreceu uma maior microporosidade que correspondeu 93,96% da porosidade total, comparado ao Argissolo Vermelho (86,31%) e ao Cambissolo Háptico (78,16%).

Porém fenômenos como dispersão do coloide do solo além de reduzir o fluxo de solução e ar, afeta de modo direto o sistema poroso do solo, pois diminui o diâmetro e volume dos poros, solos com alto valor de argila dispersa em água (ADA) como no Neossolo Flúvico (Tabela 1) podem prejudicar a estabilidade estrutural do mesmo, este comportamento pode está relacionado com a influência do sódio como agente dispersante, a predominância do sódio no complexo de troca aumenta a possibilidade de dispersão dos colóides do solo, uma vez que presente na dupla camada difusa seu elevado raio iônico hidratado promove o aumento de volume afastando os colóides reduzindo o raio de atração do mesmo.

Os valores de PSS encontrados nos solos estudados (Tabela 4) podem ter influenciado na formação das unidades estruturais. Segundo Dexter (2004a) e HALLIWELL *et al.*(2001) afirmam que valores de PSS entre 5 á 15% já exercem influência sobre a estruturação do solo podendo ocasionar uma baixa estabilidade estrutural dos agregados e dificultar o processo de macroagregação.

O diâmetro médio ponderado (DMP) apresentado pelo Argissolo Vermelho (1,27 mm), Cambissolo Háptico (2,41 mm) e Neossolo Flúvico (1,58 mm) são considerados por Watanabe et al. (2002) como solos de boa qualidade estrutural, porém

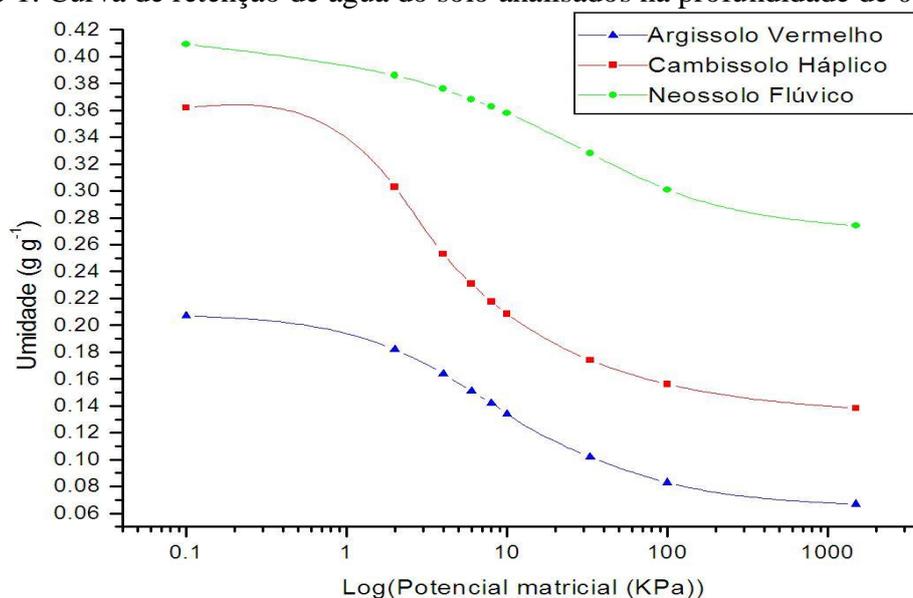
o Argissolo Vermelho (62,90% e 26,14%) e o Neossolo Flúvico (66,95% e 37,93%) apresentam uma baixa porcentagem de agregados estáveis em água e uma formação de agregados > 2 mm quando comparados ao Cambissolo Háptico (87,83% e 63,31), fatores considerados limitantes para a estabilidade estrutural do solo.

Ao analisar a curva de retenção do Cambissolo Háptico se pode observar um menor grau de degradação em relação ao outros solos estudados. O grau de estruturação e a distribuição geométrica dos poros são fatores que mais contribuem para caracterizar uma boa qualidade física, correspondendo ao valor obtido pelo índice S (Tabela 5).

A macroporosidade obtida pelo Cambissolo Háptico e Argisso Vermelho correspondeu a 21,84% e 13,35% da porosidade total. Valores superiores ao considerado como limitante para a difusão do ar no solo e desenvolvimento das plantas, o valor da porosidade de aeração não deve ser inferior a 10% do volume total do solo (CANNEL, 1977), porém o Neossolo Flúvico apresentou um valor abaixo da condição de aeração ideal de referência podendo se torna um empecilho para o desenvolvimento das culturas.

A matéria orgânica é um elemento fundamental no processo de cimentação das partículas primárias do solo. Os efeitos benéficos da matéria orgânica no solo já foram observados por diversos autores como Freire *et al.* (2007) , Dexter (2004a), Rawls *et al.* (1991; 2003), Olness e Archer, 2005. Não foi observada diferença significativa na porcentagem de matéria orgânica do entre o Cambissolo Háptico (2,02 %) e Neossolo Flúvico (2,10 %) diferente do Argissolo Vermelho (1,21%). Os valores obtidos foram superiores a média estimada para os solos do Ceara de 0,8% (FROTA *et al.*, 1974), uma vez que as camadas superficiais apresentam um maior aporte de matéria orgânica comportamento semelhante foi observado por Paladini e Mielniczuk (1991).

Gráfico 1. Curva de retenção de água do solo analisados na profundidade de 0-0,15 m.

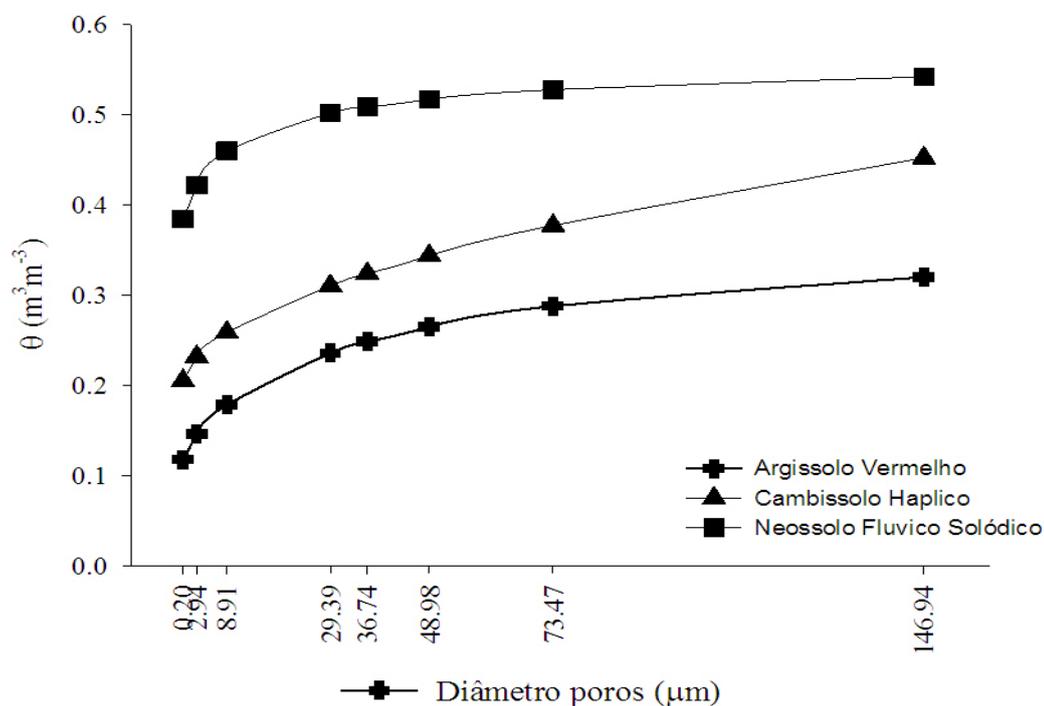


A dinâmica físico-hídrica demonstrada pelo Argissolo Vermelho (Gráfico 1), está relacionada principalmente com a composição granulométrica, uma vez que sua textura arenosa caracteriza-se por uma distribuição de tamanho de poros muito estreita, essa faixa apresenta um baixo poder de retenção de água, esvaziando-se em maior velocidade numa determinada faixa de tensões quando comparado ao Cambissolo Háplico e Neossolo Flúvico.

O índice S este diretamente ligado a curva de retenção de água, e conseqüentemente são influenciadas pelas as formas com que esta água é retida, a qual pode destacar o fenômeno de capilaridade que é influenciada principalmente pelo diâmetro dos poros no solo. Observa-se no Gráfico 2, um decréscimo gradativo do conteúdo de água com a diminuição do diâmetro de poros. Verifica-se então que o volume de poros aumenta à medida que o diâmetro diminui.

A distribuição volumétrica de poros do solo por diâmetro se encontra no gráfico 2. Os diâmetros de poros na capacidade de campo ficam em torno de 29,09 e 8,91 μm , classificado como microporos. De acordo com Koorevaar (1983) a classificação da distribuição do tamanho de poros se dá em macro (poros com diâmetro maior que 50 μm), meso (poros com diâmetro entre 15 e 50 μm), micro (poros com diâmetro menor que 15 μm)

Gráfico 2. Distribuição do conteúdo de água por diâmetro de poros nos solos analisados na profundidade de 0-0,15 m.



O Neossolo Flúvico apresentou maior capacidade de retenção de água dentre os solos estudados (Gráfico 2), indicando que ocorreu perda dos poros estruturais, com aumento do espaço poroso que retém água em altos potenciais explicando o formato de curva presente neste solo (Gráfico 1).

Os valores de U_r e U_s , como parâmetros α , m e n , obtidos do ajuste dos dados das curvas de retenção de água no solo pelo modelo de van Genuchten (1984), estão apresentados na Tabela 5.

Constata-se que o Cambissolo Háptico apresenta os maiores valores de índice S , estando acima do valor crítico de 0,035 estabelecido por Dexter (2004a), indicando muito boa qualidade física neste solo (Tabela 5). Dexter (2004a) e Da Silva (2004) afirmam que o índice S constitui bom fator para avaliar diferentes sistemas de manejo do solo, tendo em vista que este indicador tem mostrado sensibilidade com relação à ação de fatores externos sobre o aspecto estrutural.

Observa-se na tabela 5 que o Neossolo Flúvico apresentou uma maior capacidade de retenção de água, porém o mais baixo valor de S dentre os solos analisados. A composição granulométrica (tabela 1) pode está influenciando diretamente o fenômeno de retenção de água, uma vez que exercem comportamentos diferenciados na movimentação e retenção de água a depender a sua composição, além de proporcionar uma variada distribuição de tamanho de poros.

Tabela 5. Valores dos parâmetros de van Genuchten e índice S dos solos estudados na profundidade de 0-0,15m.

Solos	Parâmetros de van Genuchten (1980)					
	U_{sat} ($g\ g^{-1}$)	U_{res} ($g\ g^{-1}$)	α	m	n	S
Cambissolo Háptico	0,362	0,132	0,8991	0,0786	6,3736	0,087
Argissolo Vermelho	0,207	0,063	0,2394	0,5312	1,1556	0,033
Neossolo Flúvico	0,409	0,272	0,0064	2,7437	0,6102	0,026

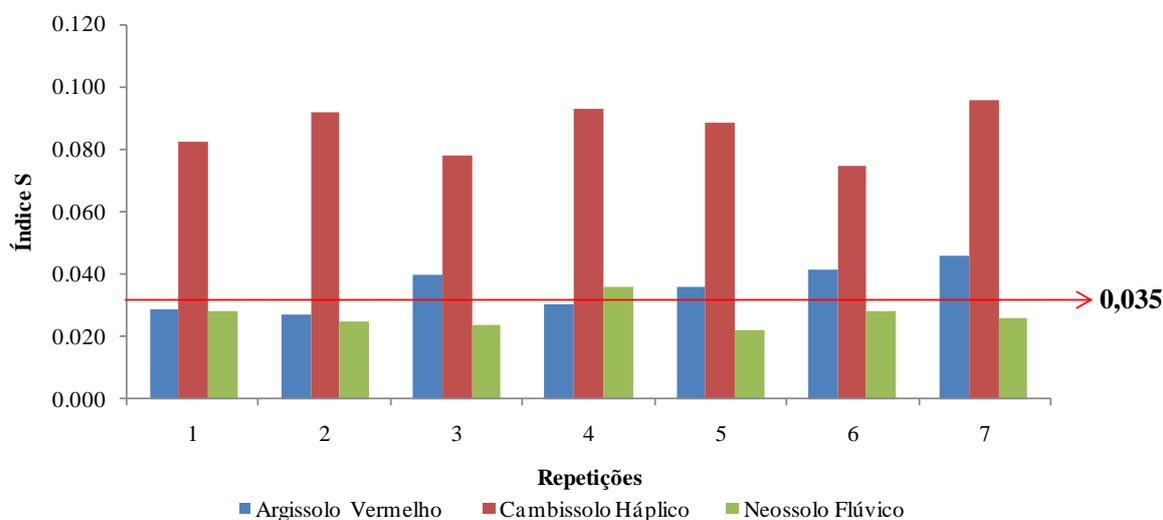
Podemos inferir que maiores valores de U_r e U_s estão associados à menores valores de D_s (ou alternativamente maior porosidade total) e um maior valor de matéria orgânica.

Van Genuchten e Nielsen (1985) sugeriram que maior valor de n obtido, se deu devido à maior porosidade total e ampla variação no tamanho de poros (Tabela 6). O

termo $1/\alpha$ regula a sucção matricial no ponto de inflexão da curva de retenção de água (Dexter, 2004a) estando relacionado com o fluxo de ar no espaço poroso (ou os maiores poros). O aumento da agregação ou teor de areia proporciona a formação de poros com diâmetros maiores, eventualmente, aumentar α .

Os valores de S obtidos pelo Cambissolo Háplico (Gráfico 3) foram superiores aos estimados por Dexter (2004a) e Andrade & Stone (2009), podendo afirmar que um grande valor de S é consistente com a existência de um elevado volume de poros que são apenas de drenagem num potencial de água correspondente ao ponto de inflexão. Quanto maior for o valor de S, maior será a taxa de liberação de água próximo ao ponto de inflexão o qual essencialmente regula a disponibilidade de água (H. ASGARZADEH *et al.*, 2011).

Gráfico 3. Distribuição do valor de “S” nos solo analisados na profundidade de 0-0,15 m.



Conforme os valores apresentados no gráfico 3 podemos constatar que o Cambissolo Háplico possui uma melhor qualidade estrutural em relação aos solos estudados onde os principais efeitos estão relacionados principalmente com a condição textural, porosidade, conectividade porosa, densidade do solo e estabilidade estrutural. O maior valor S indica uma melhor configuração de poros no solo e, portanto, menor

restrição física para o crescimento das raízes das plantas, seja por aeração, seja por restrição mecânica ou por características de retenção de água.

4.2. Regressão e Correlação das variáveis com o Índice S

Os dados apresentaram distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Na análise de correlação de Pearson, foi possível estabelecer associações positivas e negativas entre as variáveis e o índice S. Por meio da regressão linear foi possível observar o modelo matemático que mais se ajustou as variáveis utilizadas. Os coeficientes de correlação de Pearson do índice S com as propriedades físicas dos solos estudados estão descritos na tabela 6.

Tabela 6. Coeficiente de correlação (*r*) das variáveis com o índice S nos solos na profundidade de 0 – 0,15 m.

Variáveis	Índice S		
	Argissolo Vermelho	Cambissolo Háplico	Neossolo Flúvico
	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>
Argila	-0,9346**	-0,8729**	-0,9279**
Areia	0,8803**	0,8492*	0,9661**
Silte	0,8266**	-0,5320	-0,8352*
Densidade do solo	-0,7845*	-0,8745**	-0,9399**
Estabilidade de Agregado	0,8151*	0,9475**	-0,8339*
Diâmetro Médio Ponderado (DMP)	0,9421**	0,9244**	-0,7096
Porosidade Total	0,9160**	0,7991*	0,8994*
Macroporosidade	0,8999**	0,9048**	0,8185**
Microporosidade	0,9047**	-0,6788	0,8994**
Matéria Orgânica (M.O)	0,8883**	0,9019**	0,8360*
Porcentagem de Saturação de Sódio (PSS)	0,9669**	-0,6352	0,8608*
Grau de Floculação (GF)	0,7729*	-0,7305	-0,9465**

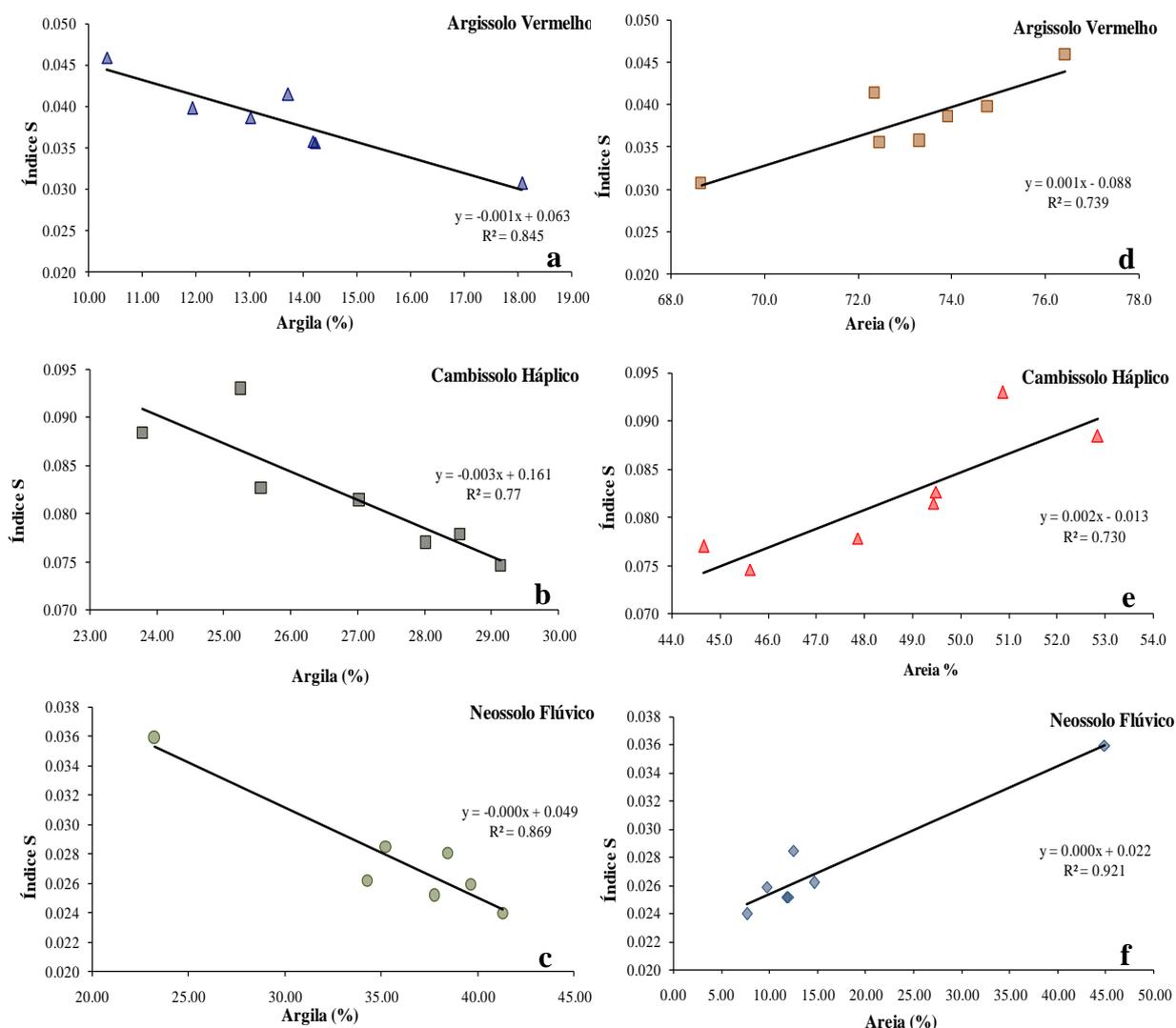
Variáveis seguidas: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

Com base na tabela 6 observa-se que no Argissolo Vermelho e Neossolo Flúvico todas as variáveis tiveram uma correlação significativa com o índice S, já no

Cambissolo Háplico variáveis como silte, porcentagem de saturação por sódio (PSS), silte e microporosidade não foi observada uma correlação significativa.

No gráfico 4 (a, b e c) os solos analisado apresentaram uma correlação negativa com aumento do teor de argila, comportamento esta associado ao aumento da microagregação e em consequência a micriporosidade, poros estes destinados a retenção de água, reduzindo os espaços porosos destinados ao fluxo de ar comportamento semelhante foi observado por Dexter (2004 a).

Gráfico 4. Ilustração “a”, “b” e “c” regressão linear do índice S e Argila (%); “d”, “e” e “f” regressão linear do índice S e Areia (%) nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.



Observa-se que os solos analisados apresentaram uma correlação positiva com a fração areia (Gráfico 4 “d”, “e” e “f”), indicando que com o aumento no teor de areia no solo ocorreu uma elevação no valor do “S”, no entanto não foi observada uma superestimativa dos valores comumente observada em solos de textura arenosa. De acordo com Dexter (2008), solos de textura arenosa apresentam uma distribuição muito estreita de tamanho de poros esvaziando em uma faixa muito estreita de tensão. Isso pode proporcionar grandes valores aparentes de S para estes solos.

No Argissolo Vermelho houve correlação positiva do silte com o índice S (Tabela 6), comportamento que pode está atrelado ao baixo teor de argila e elevada porcentagem da fração areia presente neste solo que favoreceu a influência do silte no funcionamento físico - hídrico. A microporosidade é responsável pela retenção de água, a fácil translocação da fração fina silte faz com que seja depositado nestes poros, evitando a percolação da água, aumentando assim sua permanência e melhorando a qualidade física deste solo. O comportamento da fração fina do solo tem participação efetiva na retenção de água como observada por Arruda *et al.* (1987), Centurion *et al* (1997), Centurion & Andrioli (2000).

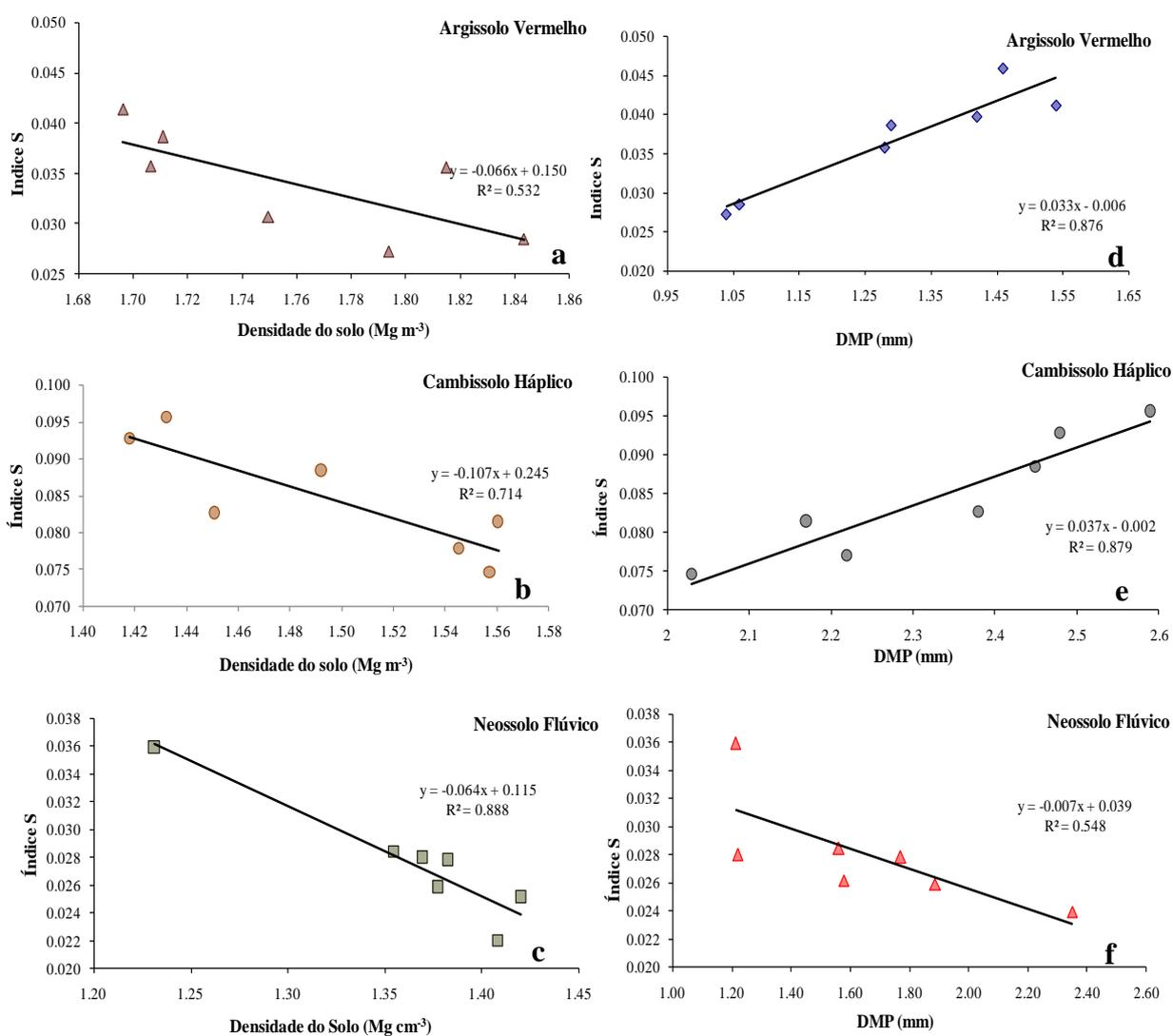
No Cambissolo Háplico e no Neossolo Flúvico o silte apresentou uma correlação negativa com o índice S (Tabela 6). Os solos de textura mais argilosa possuem uma maior quantidade de material coloidal, o mesmo encontra-se unido formando as unidades estruturais do solo proporcionando uma maior estabilidade estrutural.

As partículas de silte a depender da classificação granulométrica podem favorecer uma maior retenção de água como também se torna um fator limitante, pois em solos de textura mais argilosa ocorre uma elevação na estabilidade estrutural e conectividade porosa que acaba sendo limitada pela deposição dessa partícula nestes espaços porosos.

Os solos estudados indicaram uma correlação negativa entre o índice S e a densidade do solo (Gráfico 5). O aumento da densidade do solo influencia tanto a porosidade total como a distribuição do diâmetro dos poros, modificando as características de aeração e retenção de água do solo. As mudanças de volume de sólidos acarretam alterações na estrutura no solo provocando mudança na dinâmica de água e solutos; fluxo de gases e nas atividades biológicas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Dexter (2004a), Andrade e Stone (2009), Machado (2006), Streck *et al.* (2008). Com o aumento da densidade do solo ocorre a redução da macroporosidade e no volume de poros, consequentemente ocorre mudança no formato da curva de retenção de água. Como o índice S representa a reta tangente ao ponto de inflexão, este se torna sensível a mudança na CRA.

Gráfico 5. Ilustração “a”, “b”, “c” regressão linear do Índice S e densidade do solo (Mg m^{-3}); “d”, “e”, “f” regressão linear do Índice S e diâmetro médio ponderado (DMP (mm)) nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.



Pode-se observar uma correlação positiva entre o índice S e DMP no Argissolo Vermelho e Cambissolo Háplico, o aumento no valor do DMP proporciona uma elevação no o valor do índice S nos solos analisados (Gráfico 5 “d”, “e”). Um elevado DMP proporciona um maior número de pontos de contato entre os agregados permite o aumento nos valores de poros totais, nos valores de macroporos, resultados semelhantes ao observados por Watanabe et al (2002).

A correlação negativa mostrada pelo Neossolo Flúvico (Gráfico 5, “f”) são resultados da influência da composição granulométrica, a elevada porcentagem de silte e a fração de areia fina afetaram o processo de macroagregação e a geometria porosa contribuindo para a perda preferencial de maiores diâmetros dificultam a capacidade de infiltração, refletindo portanto na curva de retenção de água e conseqüentemente no índice S. Podemos afirmar que existe uma correlação positiva entre o DMP e índice S, ocorrendo um aumento deste índice com redução do tamanho dos agregados formados, corroborando com Dexter (2004 a) e Dexter & Birkas (2004).

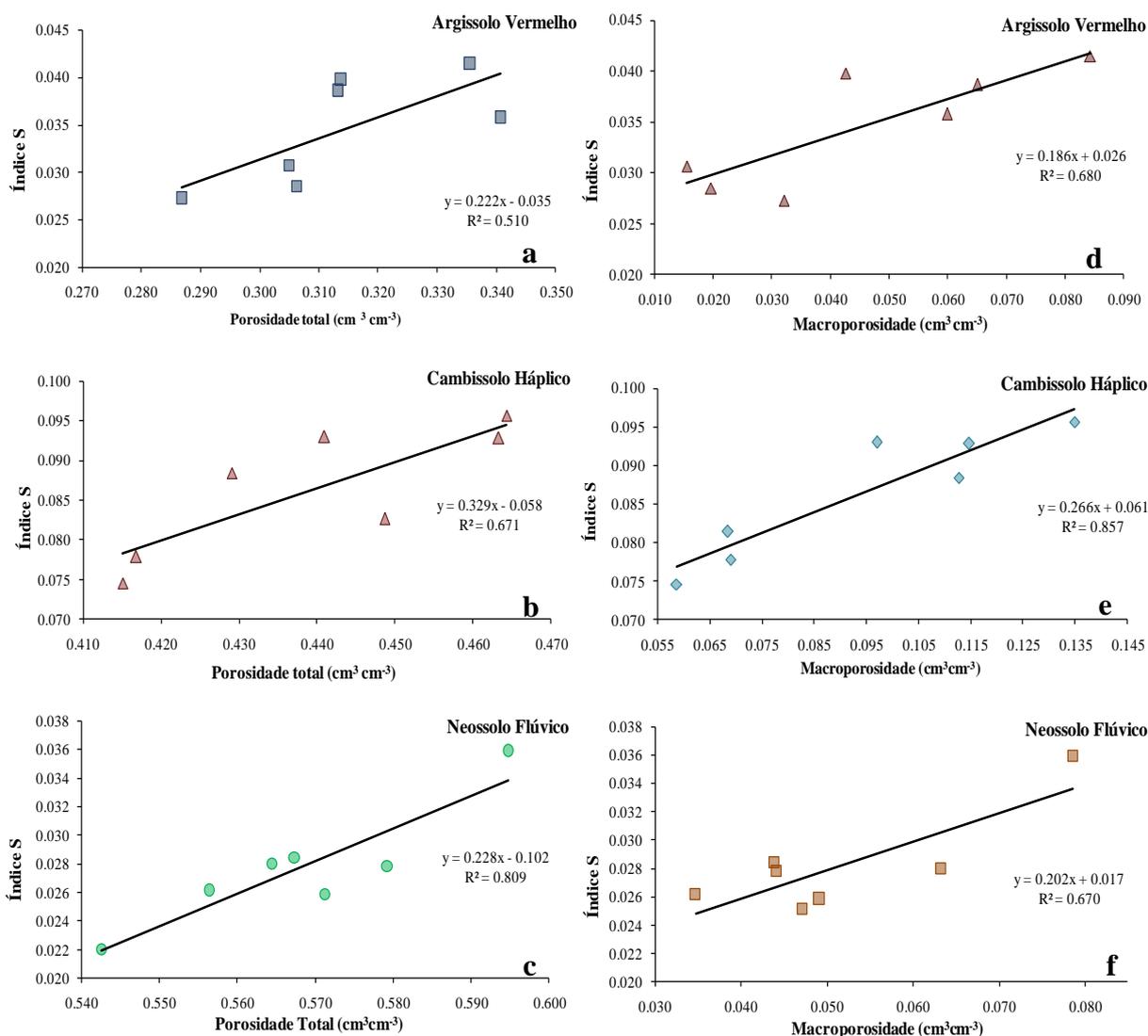
De acordo com o gráfico 6 (“a”, “b” e “c”) observa-se uma correlação positiva do índice S com o aumento da porosidade total. A porosidade do solo é o reflexo direto da condição textural e estrutural do solo, a distribuição do diâmetro dos poros é a principal ferramenta utilizada na diferenciação de macroporos e microporos no solo. A distribuição de macroporos e microporos determina o funcionamento físico hídrico do solo, conseqüentemente do índice S.

Segundo Dexter (2004 a) a porosidade estrutural é facilmente influenciada por práticas de manejo, provocando alteração na proporção de macroporos e microporos no solo, enquanto a porosidade textural apresenta uma menor variação ao longo do tempo. Assim a característica do espaço poroso do solo está estreitamente ligada à qualidade física do solo.

Os solos estudados também mostraram correlação significativa com da macroporosidade e índice S (Gráfico 6 “d”, “e” e “f”). Tendo em vista que a macroporosidade está diretamente relacionada com poros de maior diâmetro destinados ao fluxo de ar. A elevada presença de poros de maiores diâmetro pode acabar superestimando o valor do índice S, este comportamento foi observado ao encontrado por Fidalski *et al.* (2007). Segundo Dexter (2004 a, b, c) elevados valores de S estão

relacionados a uma melhor distribuição de tamanho de poros e uma maior quantidade de poros de maior diâmetro.

Gráfico 6. Ilustração “a”, “b” e “c” corresponde à regressão linear do Índice S e porosidade total ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$); “d”, “e” e “f” regressão linear do Índice S e macroporosidade ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.

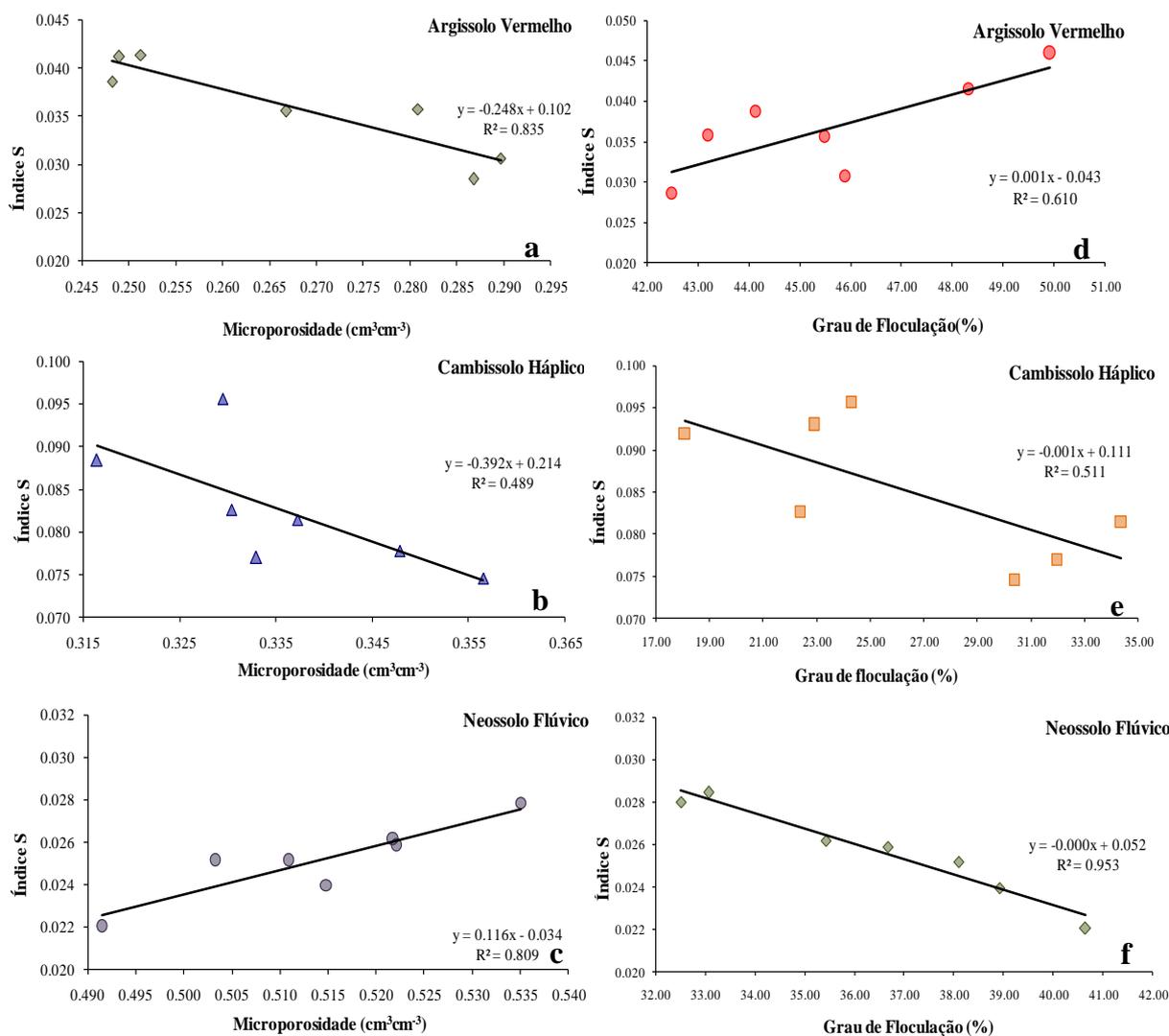


O Argissolo Vermelho e Cambissolo Háplico obtiveram uma correlação negativa do índice S com a microporosidade (Gráfico 7 “a” e “b”). Sabe-se que a dinâmica de retenção de água no solo esta diretamente ligada a microporosidade do solo, sendo influenciado diretamente pela textura do solo, uma vez que solos de textura

argilosa apresentam maior facilidade na formação de microporos quando relacionados a solos de textura arenosos este comportamento foi observado por Grohmann & Medina (1962).

O Neossolo Flúvico apresentou uma correlação negativa com a microporosidade (Gráfico 7 “c”). Apesar da elevada microporosidade, este solo apresenta uma alta porcentagem de silte que pode ter influenciando de modo negativo a conectividade porosa ($k_1 = 221, 44 \mu\text{m}^2\text{m}^{-3}$) dificultando o fluxo de água afetando consequentemente o índice S.

Gráfico 7. Ilustração “a”, “b” e “c” corresponde à regressão linear do Índice S e Microporosidade ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$); “d”, “e” e “f” regressão linear do Índice S e Grau de Floculação (%) nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.



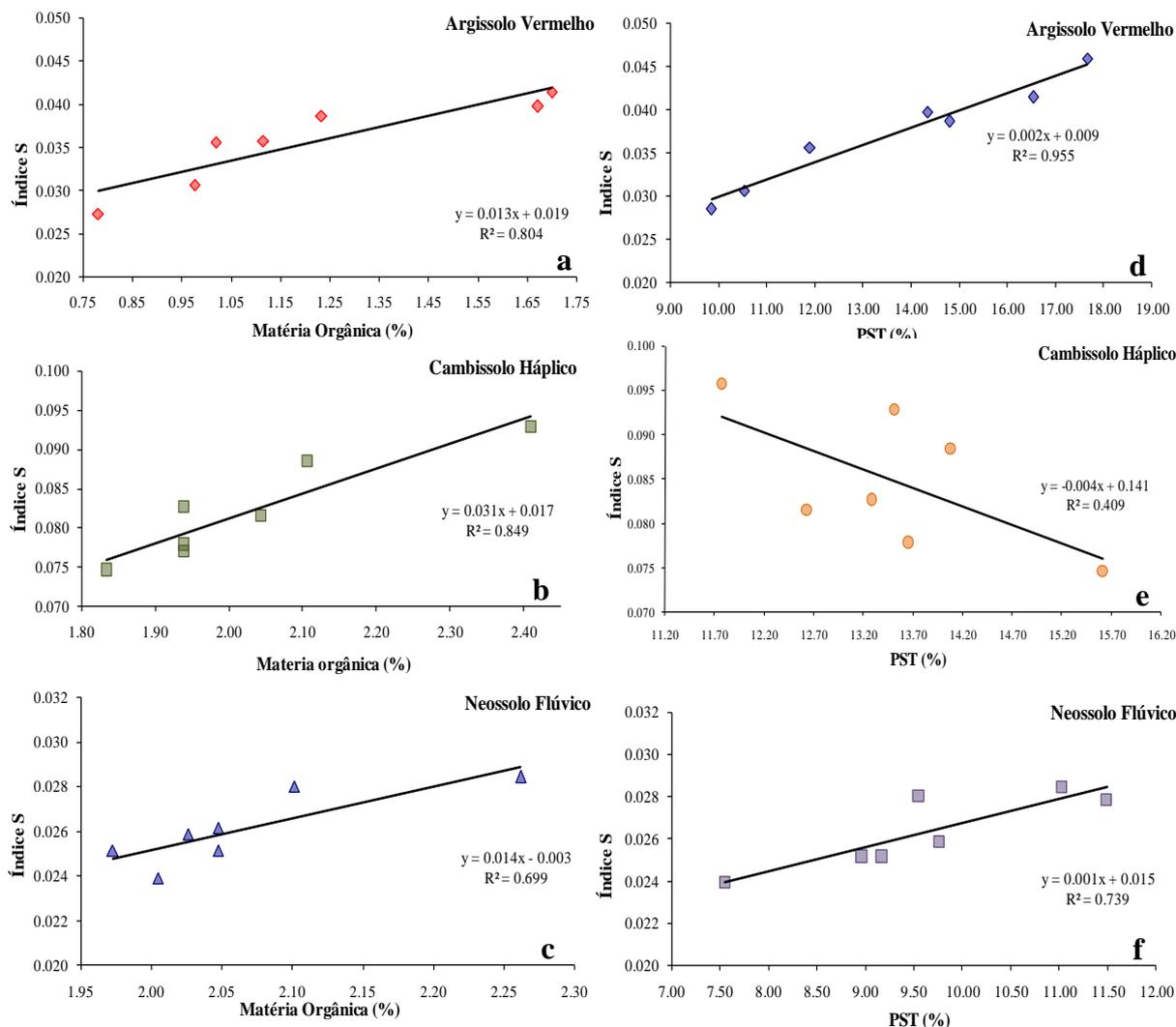
Verifica-se no Argissolo Vermelho (Gráfico 7 “d”) que o aumento do grau de floculação exerce o efeito positivo no índice S. O grau de floculação está relacionado com o processo de estruturação do solo. Este solo apresentou o maior grau de floculação e a atuação da matéria orgânica agindo como agente cimentante reduzindo a dispersão dos colóides neste solo, o baixo teor de argila pode promover uma menor estabilidade dos agregados, comportamento observado também por Dufranc *et al* (2004), Mbagwu *et al.* (1993), Boix-Fayos *et al.* (2001).

Houve uma correlação negativa entre o índice S e o grau de floculação no Cambissolo Háplico e Neossolo Flúvico (Gráfico 7 “e” e “f”). Os valores de grau de floculação inferiores a 42% influenciam de modo negativo o índice S, mais estudos sobre o comportamento dessa variável devem ser realizados, para avaliar a interação desta variável com o índice S.

Os solos analisados mostraram uma correlação positiva entre o índice S e o teor de matéria orgânica (Gráfico 8 “a”, “b” e “c”). Os efeitos benéficos da matéria orgânica tanto no aspecto de estabilidade estrutural como no aumento da capacidade de retenção de água do solo já foram observadas por autores como Dexter (2004a), Tormena *et al.* (2004) e Rawls *et al.* (1991; 2003). Os valores de matéria orgânica encontrados nos solos estudados promoveram melhorias na formação de agregados com diâmetro maior que 2 mm, que propiciou uma maior estabilidade dos agregados e DMP. Os efeitos positivos da matéria orgânica na estabilidade estrutural do solo influenciaram diretamente a curva de retenção de água e conseqüentemente promoveram melhorias no índice S.

Houve uma correlação positiva entre o índice S e o PST no Argissolo Vermelho e Neossolo Flúvico (Gráfico 8 “d” e “e”). As condições estruturais associadas com a composição granulométrica apresentada por estes solos podem ter interferido no comportamento do sódio nestes solos. Resultados contrários aos óbitos por Dexter (2004a), valores de sódio entre 5 - 15% dos íons adsorvido na superfície das argilas são suficientes para promover a dispersão das argilas e alterar a estrutura do solo. Na presença de água livre, as partículas de argila podem dispersar-se comprometendo a estrutura e o fluxo de água no solo.

Gráfico 8. Ilustração “a”, “b” e “c” corresponde à regressão linear do Índice S e Matéria Orgânica (%); “d”, “e” e “f” regressão linear do Índice S e PST (%) nos solos analisados na profundidade de 0 - 0,15 m.



No Cambissolo Háptico (Gráfico 8 “e”) o PST se correlacionou negativamente com o índice S, este solo apresentou boas condições estruturais quando comparado aos outros solos analisados. O íon sódio afeta principalmente a agregação comprometendo o arranjo estrutural, a distribuição e continuidade dos poros do solo interferindo diretamente no comportamento físico - hídrico deste solo. Halliwell *et al.* (2001) observou em solos australianos valores que varia de 6 – 15% podem causar deterioração da estrutura do solo.

Segundo Dexter (2004 a) solos sódicos a declividade do S na curva de retenção de água o ponto de inflexão não pode ser usado diretamente como uma medida de

qualidade estrutural do solo, devido ao comportamento variável de suas propriedades físicas. Diante do comportamento apresentado pelos solos estudos mais estudos sobre a influência do sódio na estrutura do solo e conseqüentemente sob o índice S devem ser realizados.

4.3. Análise Multivariada

A análise multivariada de componentes principais tem tido grande aplicabilidade na análise e interpretação dos dados, uma vez que promove o agrupamento de indivíduos com características semelhantes estabelecendo uma correlação e podendo avaliar a interação entre variáveis. Para a análise multivariada dos dados foram utilizadas as médias das variáveis em estudo: argila, silte, areia, grau de floculação (GF), densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), estabilidade de agregado, DMP, porosidade total (Pt), macroporosidade (Pma), microporosidade (Pmi), permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar), Índice S (S), matéria orgânica (M.O) e Porcentagem de Sódio Total (PST).

Tabela. 7. Autovalores e percentual da variância explicada por cada componente

Solos	Componente Principal (CP)		Variação Total (%)	Autovalores acumulados	Variação Acumulada (%)
	CP	Autovalores			
Argissolo Vermelho	1	5.87	45.12	5.87	45.12
	2	4.34	33.38	10.21	78.50
Cambissolo Háptico	1	7,27	48,46	7,27	48,46
	2	2,97	19,83	10,24	68,28
Neossolo Flúvico	1	6.37	53.10	6.37	53.10
	2	3.56	29.70	9.94	82.80

Por meio da análise de componentes principais (CP) é possível observar a interação das variáveis nos três solos analisados, foram selecionados dois componentes principais (CP 1 e 2). Para escolha dos componentes principais foram selecionados aqueles que tinham autovalores maiores que 1 (Vinci, 2005), utilizados para avaliar a correlação entre os componentes principais e as variáveis. Desta forma os componentes principais 1 e 2 do Argissolo Vermelho explicaram juntas 78,5% da variação total dos dados , no Cambissolo Háptico explicaram 68,28 % e no Neossolo Flúvico explicaram 82,80% (Tabela 7).

Com base na tabela 8, se pode observar a interação das variáveis com os respectivos fatores nos solos analisados. No Argissolo Vermelho as variáveis ligadas a porosidade estrutural (Ds, Agreg, DMP, Pt, Pma, Kar e S) tiveram uma maior contribuição para o Fator 1, enquanto variáveis a porosidade textural (Argila, Areia, GF, Dp, Pt, Pmi e PST) mostraram uma maior contribuição para o Fator 2.

Tabela 8. Correlação entre cada componente principal e as propriedades físicas e químicas dos solos estudados na camada de 0 - 0,15 m.

Variáveis	Argissolo Vermelho		Cambissolo Háptico		Neossolo Flúvico	
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
Argila	-0,45	0,65	0,84	0,20	0,89	-0,33
Silte	-	-	0,78	0,54	0,98	0,00
Areia	0,55	-0,60	-0,70	-0,41	-0,97	0,15
GF	0,10	0,82	-0,34	-0,61	-0,65	-0,41
Ds	-0,83	-0,15	0,85	-0,40	0,58	0,68
Dp	-0,21	-0,90	0,60	0,50	-	-
Agreg	0,88	0,12	-0,54	0,67	0,72	-0,68
DMP	0,86	0,18	-0,60	0,36	0,30	-0,90
Pt	0,63	-0,60	-0,77	0,51	-0,73	-0,66
Pma	- 0,91	0,04	-0,87	0,02	-0,62	-0,42
Pmi	0,30	-0,87	0,64	0,58	-	-
Kar	-0,95	-0,14	-0,66	0,49	-0,32	-0,82
S	-0,94	0,09	-0,67	0,22	-0,92	0,18
M.O	-	-	-0,78	0,34	-	-
PSS	0,08	-0,94	-0,79	-0,32	-0,67	0,47

¹ GF= Grau de Floclação, Ds= Densidade do solo, Dp= Densidade de Partículas, Agreg= Estabilidade de Agregados, DMP= Diâmetro Médio Ponderado, Pt= Porosidade Total, Pma= Macroporosidade, Pmi= Microporosidade, Kar= Permeabilidade intrínseca do solo ao ar, S= Índice S, M.O= Matéria Orgânica, PSS= Porcentagem Saturação por Sódio.

² Fator 1= Componente principal 1; Fator 2= Componente principal 2

O Cambissolo Háptico a maioria das variáveis influenciaram na composição do Fator 1 com exceção das variáveis (GF, Agreg e PST) que se correlacionaram com o Fator 2. No entanto as variáveis que contribuíram no Fator 1 do Neossolo Flúvico

foram: Argila, Silte, Areia, GF, Agreg, Pt, Pma, S e PST; já as variáveis contribuíram para o Fator 2 foram : Ds, Agreg, DMP, Pt, Pma, Kar.

Na análise das componentes principais para estabelecer uma correlação significativa às variáveis e as componentes principais devem ser superiores a 0,60 expressos em módulo. Todas as variáveis no Cambissolo Háplico obtiveram uma correlação igual ou superior a 0,60. No Argissolo Vermelho as variáveis: silte e matéria orgânica (M.O) apresentaram valores inferiores a 0,60 sendo retiradas da análise. No Neossolo Flúvico as variáveis: densidade de partícula (Dp), microporosidade (Pmi) e matéria orgânica (M.O) obtiveram o mesmo comportamento sendo não consideradas na análise (Tabela 8).

A representação gráfica das variáveis e componentes principais permitiu caracterizar a influência na discriminação dos solos estudados. As variáveis situadas em um mesmo quadrante e mais próximas entre si apresentam aproximadamente a mesma representatividade no gráfico, exercendo maior influência naquele mesmo quadrante. Da mesma forma, o ângulo de inclinação da linha em relação a cada eixo do círculo indica o quanto esta variável é correlacionada com a componente principal, todas as variáveis estão próximas ao círculo unitário indicam boa contribuição as respectivas componentes principais.

Com pode ser observado no Gráfico 9, o Argissolo Vermelho as variáveis como DMP, Pma e E.A. mostrou exercer uma maior interação com índice S, uma vez que quanto maior a proximidade das variáveis maior será a explicação da variância dos dados. Também se pode inferir que devido ao baixo teor de argila encontrado neste solo, tem-se uma maior influencia da areia no processo de estruturação deste solo, apresentando uma faixa estreita de diâmetro de poros favorecendo uma maior conectividade porosa. Este fato comprova a influência da composição granulométrica sobre o índice S, já observados por Dexter (2004a) e Streck (2008) em solos de textura arenosa.

Já o Cambissolo Háplico (Gráfico 10) mostrou comportamento similar ao Argissolo Vermelho (Gráfico 9) com relação a influência das variáveis estruturais (Kar, DMP, E.A., M.O, Pt e Pma) sobre o índice S. A distribuição dos agregados favoreceu uma boa geometria porosa neste solo, conferindo uma maior permeabilidade intrínseca do solo ar, porem a proporção de macroporos e microporos conferiu valores de “S”

acima dos estipulados por Dexter (2004a). A elevada permeabilidade intrínseca do solo ao ar pode ser explicada pelo fato da continuidade e conectividade dos poros serem mais importantes que o volume de poros (CAVARIELI, 2007).

Diante do comportamento mostrado pelo Argissolo Vermelho (Gráfico 9) e Cambissolo Háplico (Gráfico 10), podemos afirmar que as variáveis ligadas a estrutura do solo são as que exercem maior influencia podendo considerar assim um fator importante para definir uma boa qualidade física. Assim pode-se afirmar que a porosidade estrutural apresenta uma maior contribuição no índice S, fato este relacionado com sua sensibilidade a fatores externos.

Gráfico 9. Dispersão (gráfico Biplot) produzida por análise de componentes principais para o Argissolo Vermelho na camada de 0-0,15 m. Em que: Ds = densidade do solo, PT = porosidade total, Pmi = microporosidade, Pma = macroporosidade, DMP = diâmetro médio ponderado, S= índice S, Kar = permeabilidade do solo ao ar, Argila, Areia, E.A= Estabilidade de agregados, GF= Grau de Floculação, PSS= Porcentagem de Saturação por Sódio.

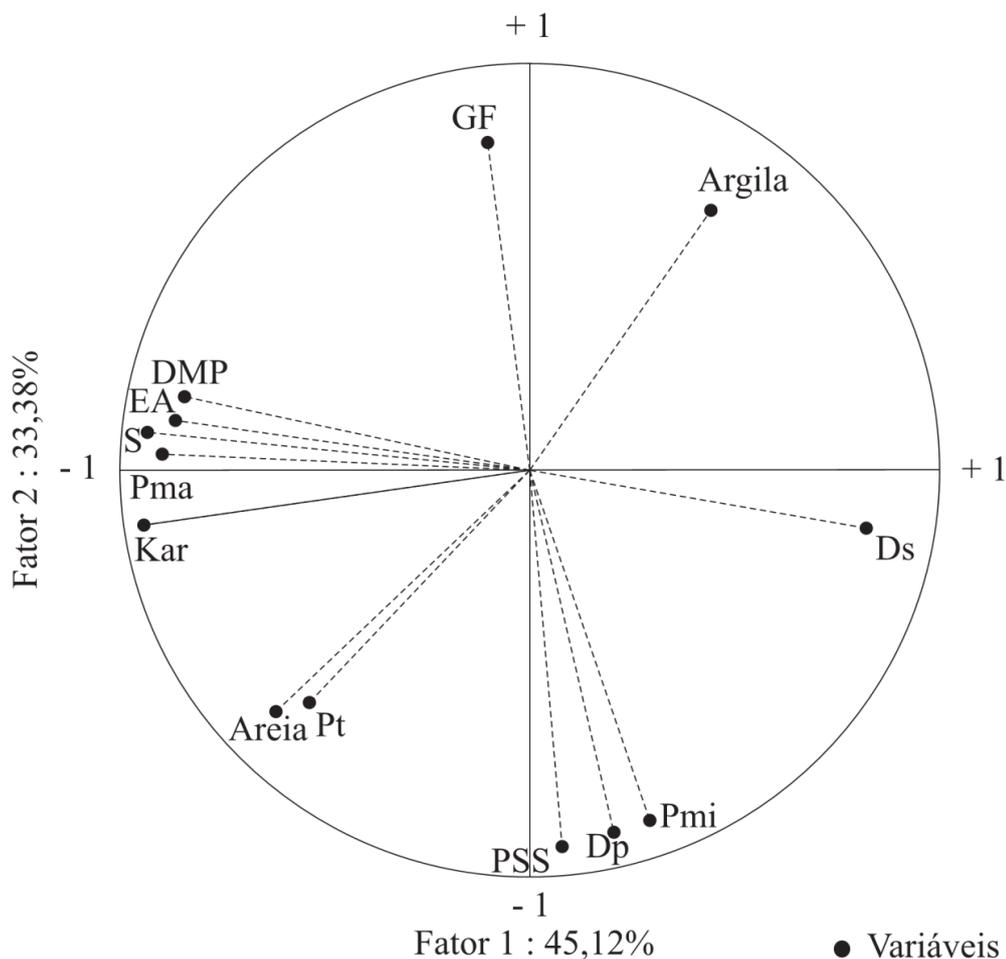
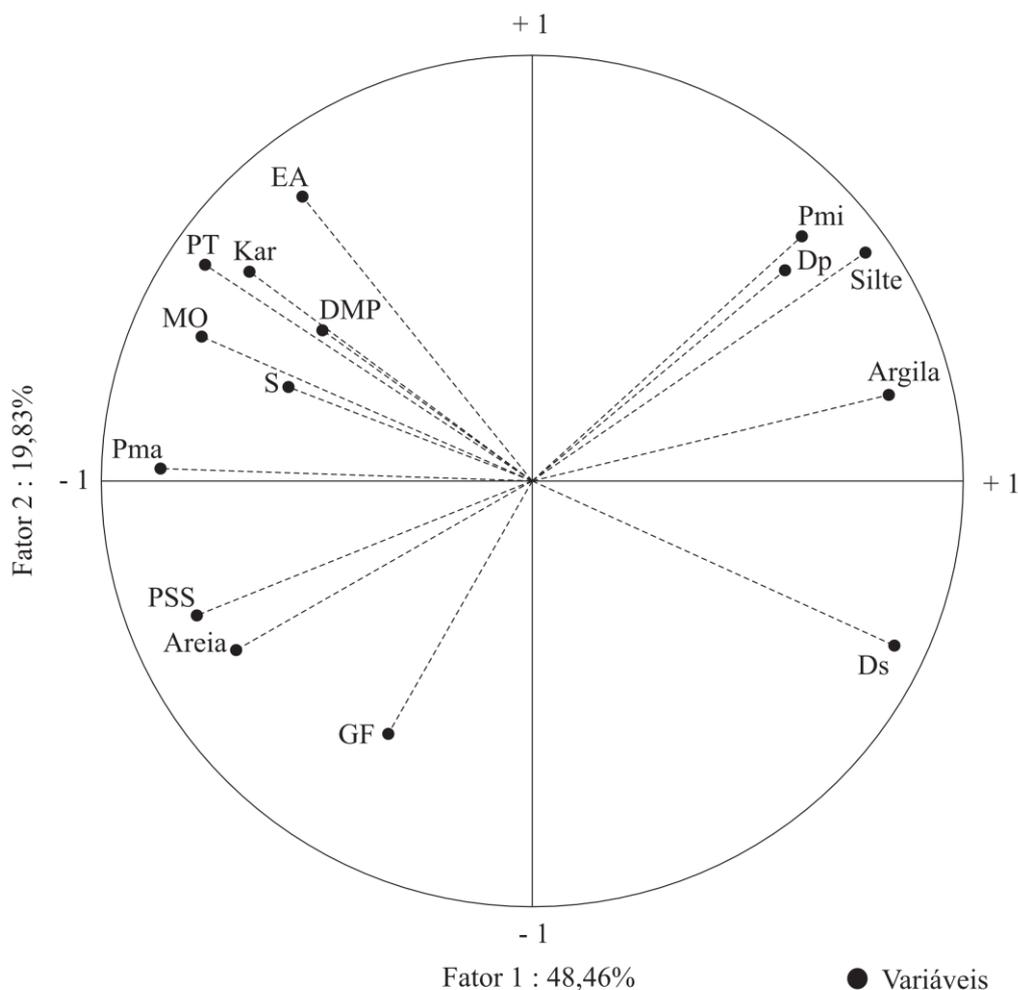


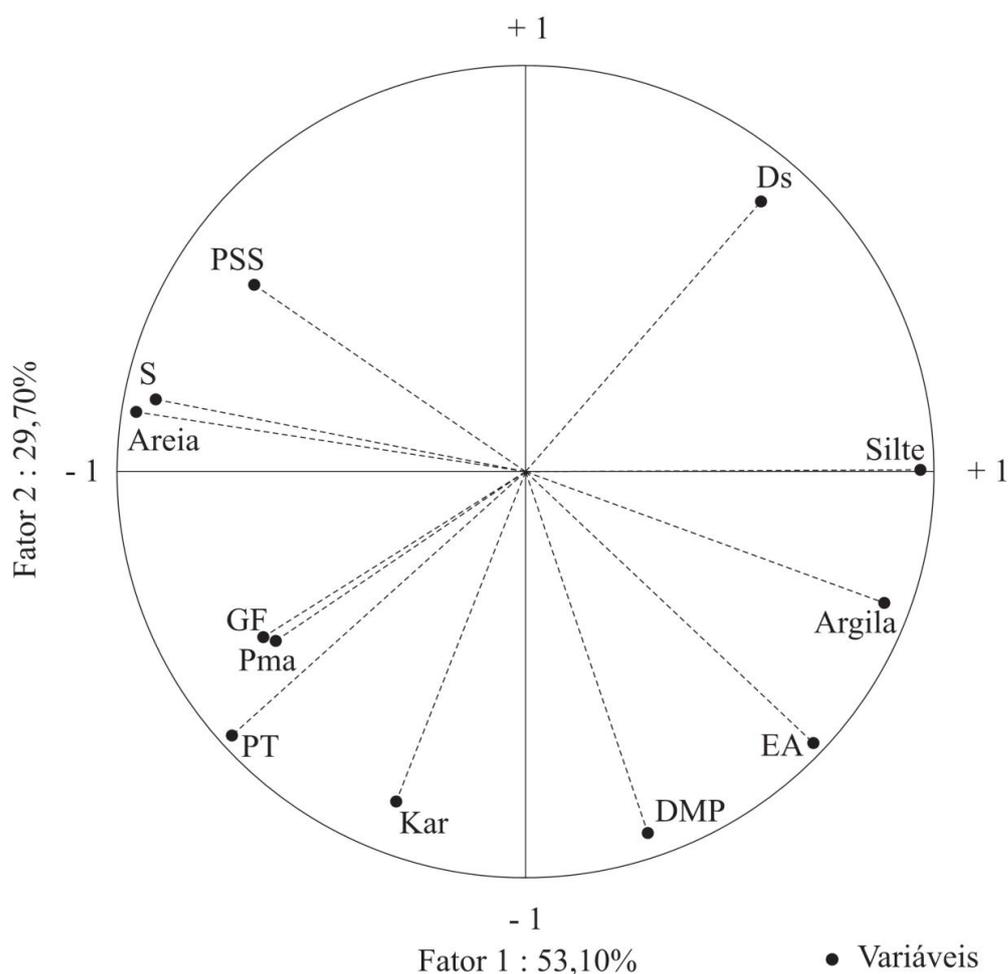
Gráfico 10. Dispersão (gráfico Biplot) produzida por análise de componentes principais para o Cambissolo Háplico na camada de 0-0,15 m. Em que: Ds = densidade do solo, PT = porosidade total, Pmi = microporosidade, Pma = macroporosidade, DMP = diâmetro médio ponderado, MO = matéria orgânica, S= índice S, Kar = permeabilidade do solo ao ar, Argila, Areia, Silte, E.A.= Estabilidade de agregados, GF= Grau de Floculação, PSS= Porcentagem de Saturação por Sódio.



No Neossolo Flúvico (Gráfico 11) as variáveis estudadas agruparam de modo que possibilitou observar a influência da areia e PSS no índice S. As variáveis ligadas ao fluxo de água e ar como Pt, Pma, Kar mostram interação situadas no mesmo quadrante, variáveis como E.A., DMP, Argila ligada à estrutura do solo. Por meio da análise multivariada foi possível observar a influência do sódio no processo de estruturação do solo e consequentemente no índice S, uma vez que variáveis situadas

em quadrantes opostos influenciam negativamente as variáveis analisadas. Tal fato já foi abordado por Dexter (2004a) sobre o comportamento deste índice em solos afetados por sódio, mais estudos.

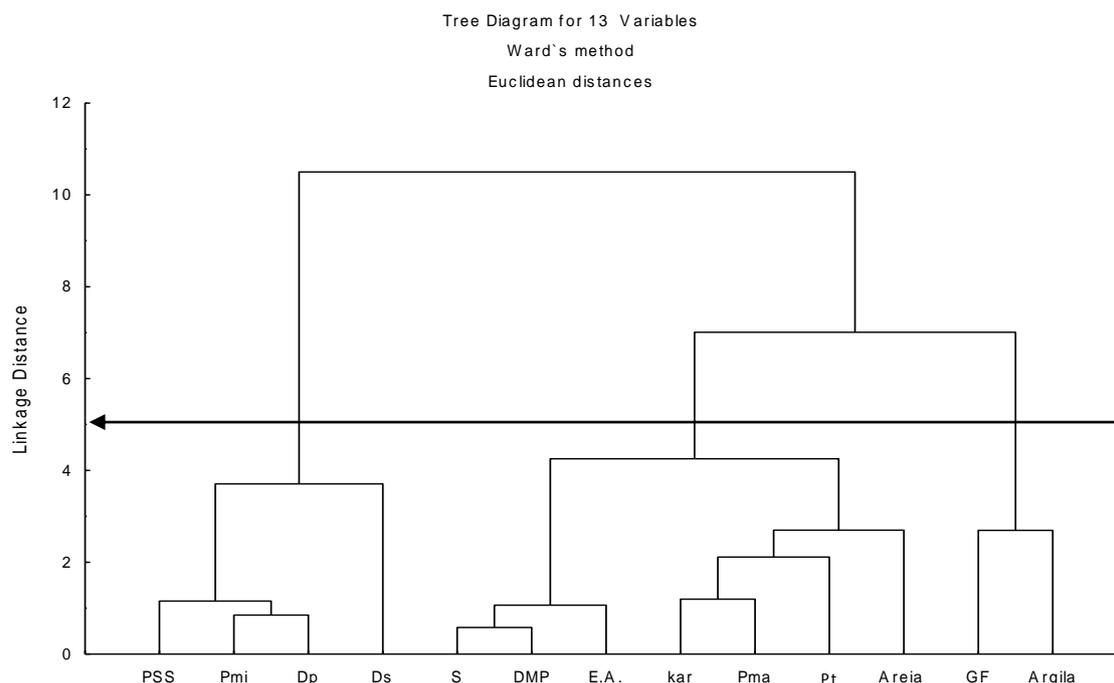
Gráfico 11. Dispersão (gráfico Biplot) produzida por análise de componentes principais para o Neossolo Flúvico na camada de 0-0,15 m. Em que: Ds = densidade do solo, PT = porosidade total, Pmi = microporosidade, Pma = macroporosidade, DMP = diâmetro médio ponderado, S= índice S, Kar = permeabilidade do solo ao ar, Argila, Areia, Silte, E.A= Estabilidade de agregados, GF= Grau de Floculação, PSS= Porcentagem de Saturação por Sódio.



De acordo com a figura 9, 10 e 11, é possível observar que temos a formação de dois grupos nos solos analisados, porém cada variável foi agrupada de acordo com as características apresentadas por cada solo. A delimitação dos grupos na análise de agrupamento foi realizada no ponto de maior mudança de nível, que permite a divisão

dos grupos com certa semelhança. Verifica-se que no Argissolo Vermelho (Figura 9), a variável de estudo S encontra-se agrupada com DMP e E.A variáveis estas ligadas a estruturação do solo, estabilidade estrutural e formação de poros. A questão de a argila formar um grupo isolado pode está relacionada com seu baixo teor encontrado neste solo, se tem uma maior influência da areia no processo de estruturação deste solo, porém apresenta uma baixa estabilidade estrutural aumenta a suscetibilidade do solo a fatores externos.

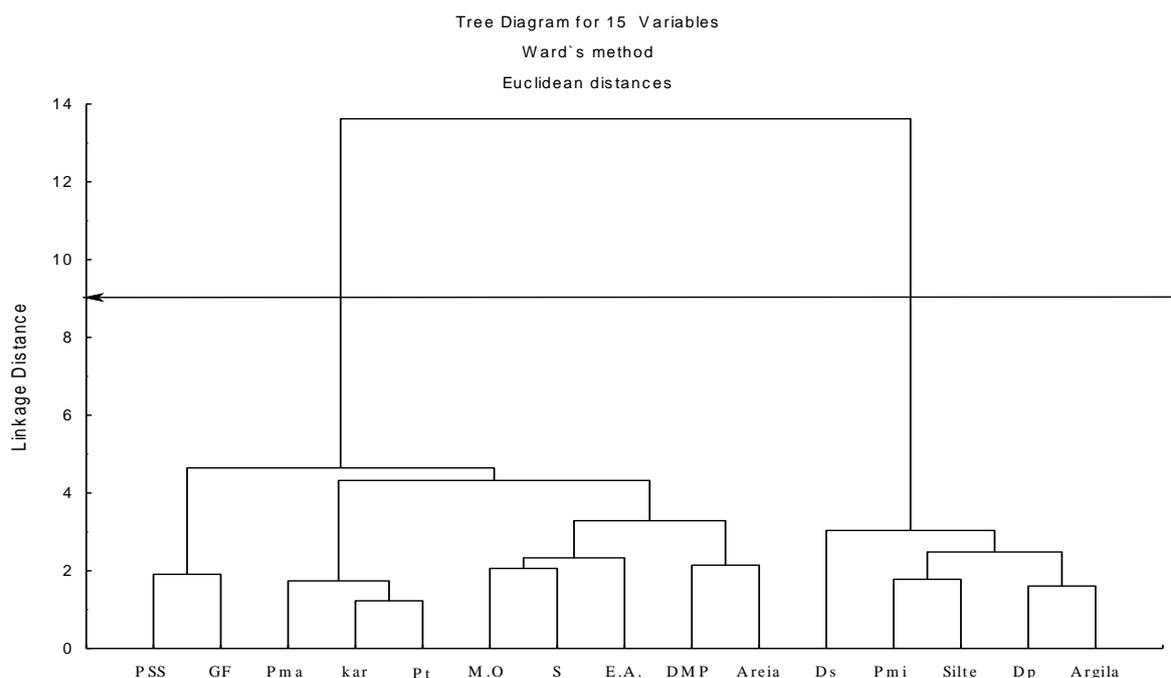
Figura 9. A análise de agrupamentos das variáveis utilizadas para a formação dos grupos Índice S (S), Macroporosidade (Pma), Permeabilidade do solo ao ar (Kar), Estabilidade de Agregado (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Densidade de partícula (Dp), Grau de Flocculação (GF), Porcentagem de Saturação por Sódio (PSS), Densidade do solo (Ds), Areia, Microporosidade (Pmi), Silte, Matéria Orgânica (M.O), Porosidade Total (α), Argila no Argissolo Vermelho na camada 0-0,15 m.



No Cambissolo Háplico (Figura 10), é possível verificar que o índice S também se encontrou ligado à questão estrutural, uma vez que estas variáveis são responsáveis por proporcionar neste solo uma adequada distribuição de tamanho de poros e conectividade porosa conferindo uma boa qualidade física do solo. Diante dos

valores de S e sua ligação com o aspecto estrutural do solo (porosidade total, macroporosidade, microporosidade, DMP, EA e M.O), se pode afirmar que o índice S apresenta sensibilidade para identificar a degradação da qualidade física do solo, resultado já observado por Dexter (2004a), Tormena et al (2004, 2008), Streck (2008), Andrade et al. (2009).

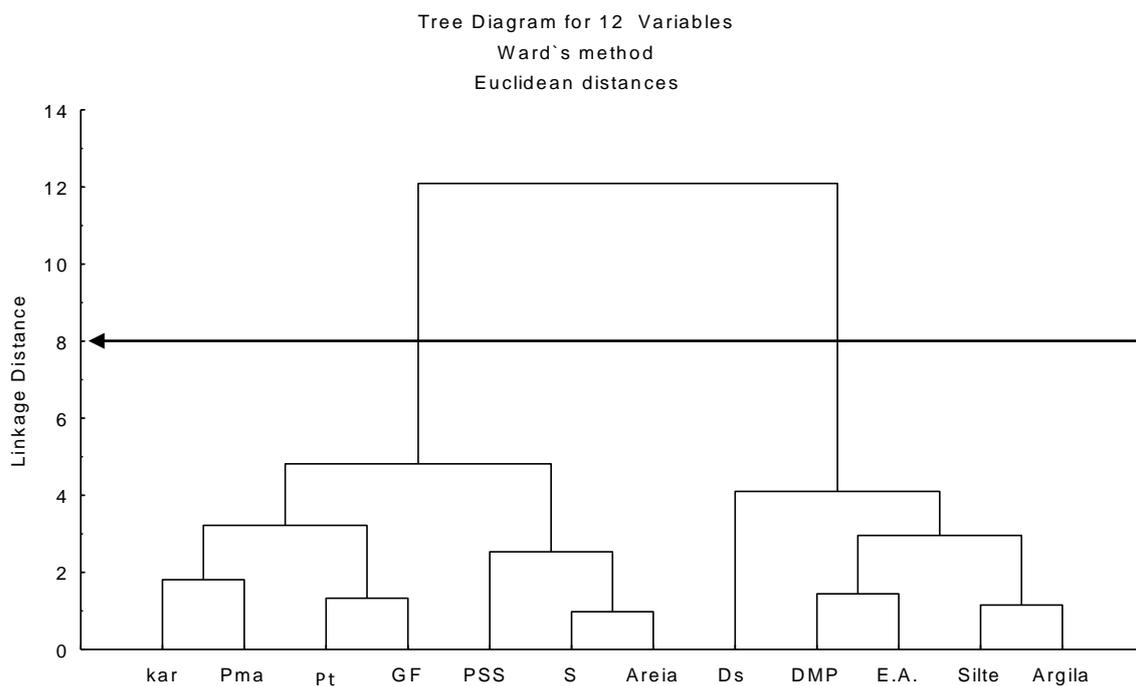
Figura 10. A análise de agrupamentos das variáveis utilizadas para a formação dos grupos Índice S (S), Macroporosidade (Pma), Permeabilidade do solo ao ar (Kar), Estabilidade de Agregado (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Densidade de partícula (Dp), Grau de Flocculação (GF), Porcentagem de Sódio Total (PST), Densidade do solo (Ds), Areia, Microporosidade (Pmi), Silte, Matéria Orgânica (M.O), Porosidade Total (α), Argila no Cambissolo Háplico na camada 0-0,15 m.



Já o Neossolo Flúvico (Figura 11) foi possível observar a influência do sódio sob o índice S. O acúmulo de sódio aumenta a dispersão dos colóides no solo provocando uma redução na estabilidade dos agregados, dificultando o processo de macroagregação, afetando principalmente a estrutura, distribuição e continuidade porosa alterando as propriedades hidráulicas do solo. Crescimanno *et al* (1995) em sua análise

da curva de retenção de água neste tipo de solo observou que o aumento da PSS proporciona uma redução no valor do índice S.

Figura 11. A análise de agrupamentos das variáveis utilizadas para a formação dos grupos Índice S (S), Macroporosidade (Pma), Permeabilidade do solo ao ar (Kar), Estabilidade de Agregado (Agreg), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Grau de Floculação (GF), Porcentagem de Sódio Total (PST), Densidade do solo (Ds), Areia, Silte, Porosidade Total (α), Argila no Neossolo Flúvico na camada 0-0,15 m.



5. Conclusões:

Os resultados apresentados neste trabalho confirmaram a hipótese de que o índice S responde de forma diferenciada a solos com texturas distintas, uma vez que a forma de retenção de água entre os solos é diferenciada. Diante as limitações apresentadas pelo índice S é de fundamental importância utilizar os outros atributos físicos para embasar a qualidade física real apresentada pelo solo.

Assim sendo, fatores relacionados com o solo (textura e estrutura) e com manejo (matéria orgânica do solo, compactação e preparo) que influenciam a distribuição do tamanho de poros refletem em mudanças nos valores de S, e, portanto, na qualidade física do solo

A estatística multivariada permitiu visualizar a interação conjunta dos atributos físicos do solo nos solos estudados, diante do comportamento foi possível afirmar que as variáveis ligadas a formação de agregados e estruturação do solo exercem uma maior influência no índice S.

A avaliação da qualidade física do solo depende muito das condições ambientais, sobretudo da atuação conjunta de vários atributos existentes na relação solo-planta. Este índice mostrou sensibilidade aos atributos como porosidade, estabilidade estrutural e densidade do solo que representam uma pequena parcela do todo. Diante disso mais estudos sobre a aplicabilidade deste índice devem ser realizados antes de considerá-lo como indicador de qualidade física do solo.

6. Referências Bibliográficas:

AHUJA, L.R., NANEY, J.W., GREEN, R.E., NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 48, 670–699, 1984

ALMEIDA, D.M.B.A.; ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.M. & NESS, R.L.L. Importância relativa dos íons na salinidade de um Cambissolo na Chapada do Apodi, Ceará. **Rev. Eng. Agríc.**, 25 (3): 615-621, set./dez. 2005

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C. **Física do Solo: conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 289p., 2008

ANDRADE, R. DA S. & STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, v.13, n.4, p.382–388, 2009.

ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.M.; ALEXANDRE, D.M.B.; PALÁCIO, H.A.Q.; LIM, C.A. Investigação de mudanças do status salino do solo pelo emprego de análise multivariada. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 15 (4): 410–415, 2011.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:337-345, 2004a.

ARAÚJO, A. P.B., COSTA, R. N. T., LACERDA, C.F., GHEYI, H. R. Análise econômica do processo de recuperação de um solo sódico no Perímetro Irrigado Curu-Pentecoste, CE. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb**, v.15, n.4, p.377–382, 2011.

BALL, B. C.; O'SULLIVAN.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, 39: 327-339, 1988.

BAMBERQ, A. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; TIMM, L. C.; PINTO, L. F. S.; LIMA, A. C. R.; SILVA, T. R. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **R. bras. Ci. Solo**, 33(5): 1079-1086, 2009.

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

BEUTLER, A.N.; CENTURION J.F.; Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. 38: 849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION , J.F.; SOUZA, Z .M. ; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:829-834, 2002.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. **Braz. Arch. Biol. Technol.**, 48:863-871, 2005

BOIX-FAYOS, C.; CALVO-CASES, A.; IMESON, A.C. & SORIANO-SOTO, M.D. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. **Catena**, 44:47-67, 2001

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, 1986a. pt. 1, p.363-375. (Agronomy Monography, 9).

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, 1986b. pt. 1, p.377-382. (Agronomy Monography, 9).

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7ª ed. Rio de Janeiro, 1989. 898p.

BRITO A. S.; **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função em função dos conteúdos de água e ar no solo**; 2010 – 126 p. Dissertação (Doutorado em Solo e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CANNELL, R.Q. 1977. Soil aeration and compaction in relation to root growth and soil management. **Applied Biology**, vol.2: 1-86

CAVALIERI, K.M.V. **Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação física do solo**. 2007. 73 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2007.

CENTURION, J.F.; MORAES, M.H. & DELLA LIBERA, C.L.F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 21: 173-179, 1997.

CENTURION, J.F. & ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24:701-709, 2000.

CONSENSA C.O. ; VOGELMANN E.S.; REICHERT J.M.; PREVEDELLO J. ; OLIVEIRA A. E.; REINERT J.D. Relação entre o índice “s” e algumas propriedades físico-hídricas de diferentes solos do rio grande do sul. . **In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 31. 2011. Anais. Uberlândia/MG, SBCS, 2011. CD-ROM.

CRESCIMANNO, G., IOVINO, M., PROVENZANO, G. Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 59, 1701 – 1708, 1995.

DA SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINIERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo á penetração em plantio direto. *Ciência Rural*. Santa Maria, v. 34, nº 2, mar-abr, 2004.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, pt. 1, p.443-461, 1986. (Agronomy Monography, 9).

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **J. Agric. Eng. Res.**, v.31:139-147, 1985.

DEXTER, A.R., *Advances in Characterization of Soil Structure*. **Soil & Tillage Research**, v.11, pg. 199-238, 1988.

DEXTER, A.R.; BIRKAS, M. Prediction of the soil structures produced by tillage. **Soil Till. Res.**, 79:233-238, 2004.

DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, 120:201-214,2004a.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma** , 120:215-225, 2004b.

DEXTER, A.R. Soil physical quality Part: III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, 120:227-239, 2004c.

DEXTER, A.R.; CZYŻ, E.A; RICHARD, G.; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil, **Geoderma** 143, 243–253, 2008.

DORAN, J.W., PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. **In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**, SSSA, Madison, WI, USA. p. 3-21, 1994.

DOURADO NETO, D.;NIELSEN, D.; HOPMANS, J.; PARLANGE, M.; **Soil water retention curve, SWRC software (versão 1.001)**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 1995.

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Perímetro irrigado Jaguaribe-Apodi. Disponível** em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html> Acesso em 30 agosto. 2011.

DUFRANC, G.; DECHEN, S.C.F.; FREITAS, S.S.; CAMARGO, O.A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. . **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.505-517, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.212p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília:** EMBRAPA. Produção e informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA solos, 1999.412p.

ERICKSON, A.E. Tillage effects on soil aeration. **In. PREDICTING TILLAGE EFFECTS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND PROCESSES**, 1982, Madison. Proceedings. American Society of Agronomy, 1982, p.91-104.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. . **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 23, n.3, p. 515-524, 1999

FERREIRA, M.M. **Caracterização física do solo**. In: VAN LIER, Q.J. 1º Edição; Física do solo; **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG; 2010, p. 1-24.

FELTON, G.K. & ALI, M. Hydraulic parameter response to incorporated organic matter in the B-horizon. **Am. Soc. Agric. Eng.**, 35:1153-1160, 1992

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. & SCAPIM, C.A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho cultivado com citros. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:9-19, 2007.

FREIRE, M.B.G.D.S.; FREIRE, F.J.; Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J.C.L. (Eds). Fertilidade do solo, Visoça , **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 929-954, 2007.

FROTA, J. N. E.; REBOUÇAS, M. A. A. . Relação da matéria orgânica – nitrogênio em solos do estado do Ceará, Brasil. **Cien.Agron.**, v 4, p.31-33, 1974

FUNCEME. LEVANTAMENTO DE RECONHECIMENTO DE MÉDIA INTENSIDADE DOS SOLOS- MUNICÍPIO QUIXERAMOBIM, **Projeto Zoneamento Agroecológico do Estado do Ceará – ZACE**, 2011.

GATE, O.P.; CZYZ, E.A. & DEXTER, A.R. Soil physical quality S as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils. In: HORN, R.; FLEIGE, H.; PETH, S. & PENG, X. **Soil management for sustainability**. Reiskirchen, Catena Verlag, p.102-109, 2006.

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

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT; J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v.39, n.1, 2009.

GIRÃO, R.O. **Caracterização de solos desenvolvidos sobre rochas calcárias**. 2007. 58f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

GUERRA, J.G.M.; SANTOS,G.A.;SILVA,L.S.; CAMARGO F.A.O. **Macromoléculas e substâncias húmicas**. In: SANTOS, A. G.; SILVA, S. L.; CANELLAS P. L.; CAMARGO, A.O.F.; Fundamentos da Matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais,2ª Ed. Editora Metrópole, Porto Alegre, 654p, 2008

GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical Assessment of a Soil with Respect to Rooting Potential. **Geoderma**.34: 101-114, 1984

GROHMANN, F. e MEDINA, H.P. Características de umidade dos principais solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, 21:285-295, 1962.

H. ASGARZADEH, M.R. MOSADDEGHI, A.A. MAHBOUBI, A. NOSRATI, A.R. DEXTER; Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality, **Geoderma**, V. 166, p. 34–42, 2011.

HALLIWELL, D.J.; BARLOW, K.M.; NASH, D.M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Australian Journal of Soil Research**, v.39, p.1259-1267, 2001.

HAIR, J.F, ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L.; BLACK, W. **Análise Multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 595 p., 2005

HUTSON, J.L. & CASS, A. A retentivity function for use in soil-water simulation models. **J. Soil Sci.**, 38:105-113, 1987.

HILLEL, D.; **Introduction to environmental soil physical**, University of Massachusetts, Massachusetts, USA. p. 494 , 1998.

IVERSEN, B. V.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; LOLL, P. . Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**. Baltimore, v. 166, n. 10, p. 643-659, Oct, 2001.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **J. Soil and Water Conserv.**, 55: 69-78. 2000.

IMHOFF, S.D.C.; **Indicadores de qualidade estrutural trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 104p. Tese de Doutorado, Escola Superior Luiz Queiroz/ USP, Piracicaba, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66:1656-1661, 2002.

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

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

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

KIRKHAM, M. B.; **Principles of soil and plant water relations**, Kansas State University, Elsevier Academic Press, p. 500, 2005.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p.959-964, 2000.

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

KLEIN, V. A. **Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. Passo Fundo: Ed. UPF, 61 p., 2005

KLEIN V. A.; **Física do solo**; 212 p.; Editora UFP, Passo Fundo, 2008.

KIEHL EDMAR J. , **Manual de Edafologia – Relação Solo-planta**; 262 p.; Editora Agrônômica “Ceres” LTDA.; São Paulo – SP; 1979.

KOOREVAAR P.; MENELIK, G.; DIRKSEN C.; Elements of soil physics; **Elsevier science B.V.** p. 228, 1983.

KREIDLER, W.L.; ANDERY,P.A.; **Mapa geológico da área sedimentar costeira do estado do Rio Grande do Norte e parte do Ceará**; CNP; Rio de Janeiro,1949.

KRETZSCHMAR, R.; HESTERBERG, D. & STICHER, H. Effects of adsorbed humic acid on surface charge and flocculation of kaolinite. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61:101-108, 1997.

LARSON, W.E., PIERCE, F.J. **Conservation and enhancement of soil quality**. In: Dumanski, J. (Ed.), Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Proceedings of the International Workshop, Chiang Rai, Thailand, 15 – 21 Sept. 1991. Technical papers, vol. 2. Int. Board for Soil Res. and Management, Bangkok, Thailand, pp. 175 – 203.

LAL R. e SHUKLA, M.K. **Principles of Soil Physical**. The Ohio State University Columbus, Ohio, 699p, 2004

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

LIBARDI, P.L.: **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: editora da Universidade de São Paulo, 497p., 1995.

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

LIER VAN J.Q., **Física do Solo** – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 298 p.; Viçosa – Minas Gerais, 2010.

LOVELAND, P. & WEBB, J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review, **Soil Till. Res.**, 70:1-18, 2003.

MACHADO, J. L. **Qualidade física de solos em distintos sistemas de uso e manejo quantificada pelo índice S**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós Graduação em Agronomia, 2006.

MARCHÃO, R.L.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; SILVA, E.M.; SÁ, M.A.C.; BALBINO, L.C.; VILELA, L. & BECQUER, T. Parâmetro 'S' e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 31., Gramado, 2007. Anais.Gramado, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2007.

MENDES, G.F.; MELLONI, E.G.P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá-MG. **Cerne**, Lavras, 12:221-220, 2006.

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

MILLER, A. *Meteorology*. 2.ed. Columbia/Ohio: Charles E. Merrill Publishing Company, 1971, 154p

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. & DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção. **Sci. Agríc.** 50: 383-392, 1993.

MONHANTY, B.P.; SKAGGS, T.H.; VAN GENUCHTEN, M.T.; Impact of Saturated Hydraulic Conductivity on the Prediction of Tile Flow. **Soil Sci. Soc. Am. J**, Madison, v. 62, 1522-1529, 1998.

MOTA, F.O.B. OLIVEIRA, J.B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará, **R. Bras. Ci. Solo**, 23:799-806, 1999.

MOTA, J. C . et al. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi , R N , cultivados com melão. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 49-58, 2008.

MBAGWU, J.S.C.; PICCOLO, A. & MBILA, M.O. **Water-stability of aggregates of some tropical soils treated with humic substances**. *Pedologie*, 43:269-284, 1993.

OLNESS, A.; ARCHER, D. Effect of organic carbon on available water in soil. **Soil Science**, 170:90-101, 2005.

OLIVEIRA, A.P.; NEVES J.C.L.; JOÃO CARLOS KER J.C.; ROCHA G.C., BARROS N.F. ; LEITE F.P.; NEVES A. T. G. Índice “S” e suas relações com características físicas de solos e com a produtividade de eucalipto. **In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 31. 2011. Anais. Uberlândia/MG, SBCS, 2011. CD-ROM.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, 76:319-337, 1984.

OADES, J.M. Mucilages at the root surface. **J. Soil Sci.**, 29:1-16,1978.

PALADINI, F.L.S. & MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:135-140, 1991.

PEREIRA, S.F.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, S.F.; OLIVEIRA, R.P.; CENTURION, F.J.; FALQUETO, J.R.; MARTINS, S.L.A.; Qualidade Física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice “S”. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35: 87-95, 2011

PERAZA J.E.S.; **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**; 2003 – 135 p. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2003.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; YAMAGUCHI, T.; SCHJONNING, P. & HANSEN, J.A. Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil-vapor extraction efficiency. **Ground Water Monit. R.**, 19:61-70, 1999.

RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116:61-76, 2003.

RAWLS, W.J.; GISH, T.J. & BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Adv. Soil Sci.**, 16:213-234, 1991.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo,. 188p., 1987.

REYNOLDS, W.D.; Saturated Hydraulic Conductivity: Laboratory Measurement . In: Carter, M.R. (Ed.). *Soil Sampling and methods of analysis*, Boca Raton Lewis Publication; Florida, **Canadian Society of Soil Science**, p 589- 598.,1993.

REYNOLDS, W.D.; DRUDY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A; YANG, X.M.; ZHANG, T.Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.96, p. 313-330, 2007.

RESENDE, M; CURI, N; REZENDE, S. B.; CORREA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. Lavras: UFLA, 2007

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **R.Ci.Amb.**, 27:29-48, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C.: **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri; Manole, 478p., 2004.

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

REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. *Ci. Rural*, 36 (6): 1931-1935, nov-dez, 2006. (Nota)

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

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

ROTH, C.H., CASTRO FILHO, C. & MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:241-248, 1991.

RENGASAMY, P., AND K.A. OLSON. Sodicty and soil structure. *Austr. J. Soil Res.* v29 : 935 – 952, 1991.

SAMPAIO, A.V.; SCHALLER, H.; Introdução a estratigrafia da Bacia do Potiguar; **Bol. Téc. Petrobrás**, v.11, n.1, p.19-44, Rio de Janeiro, 1968.

SANTOS, A. G.; SILVA, S. L.; CANELLAS P. L.; CAMARGO, A.O.F.; **Fundamentos da Matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, 2ª Ed., Editora Metrópole, Porto Alegre, 654p, 2008.

SANTOS, G.; CAMARGO, F. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Ed. Gênese edições, Porto Alegre, Brasil, p. 508, 1999

SEPLAG. SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E GESTÃO; IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Boletim do agronegócio cearense - 3º Trimestre 2009**. Fortaleza, 2009a, 18p.

SILVA, A.P & S. IMHOFF, N. F. B. GIAROLA; Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil; **R. Bras. Ci. Solo**; v. 26:885-893, 2002.

SILVA, F.F.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, F.F. & ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, 13:191-204, 2008.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, Á. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v.35, n.3, 2005.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:1775-1781, 1994.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Sci.Soc. Am. J.**, 61:877-883, 1997.

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.;TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A. C. A.. Determinação da permeabilidade do solo ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **R. Bras. Ci. Solo**, 33:1535-1545, 2009.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:9-15, 2002.

SILVA, A.P.. **Caracterização física do solo**. In: VAN LIER, Q.J. 1º Edição; Física do solo; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG; p. 242-280, 2010.

SILVA, A. J. N.; CABECA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeitos de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29. p. 833-842, 2005.

SILVA, E. A; OLIVEIRA, G. C; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, L. M.; SOUZA, Z. R.. Índice “S” como indicador da qualidade estrutural de um Cambissolo do cerrado brasileiro sob cultivo do cafeeiro em sistema de manejo conservacionista. **In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 31. 2011. Anais. Uberlândia/MG, SBCS, 2011. CD-ROM

SILLON, J.F., RICHARD, G., COUSIN, I. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation. **Geoderma** 116, 29–46, 2003.

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Sci.**, 154:269-280, 1992.

SOUZA, S.M.; Atualização da litoestratigrafia da Bacia do Potiguar, **In: Congresso Brasileiro de Geologia**, 32. Salvador, SBG; Anais, v.5 p.2392-2406, 1982.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press. 2008. 329 p.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. & HORN, R.. Relações do parâmetro s para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:2603-2612, 2008.

STENBERG, B.; Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. **Soil Plant Sci.**, 49: 1-24, 1999.

STENGEL, P. 1990 ; **Soil Structure**. In: LAL R. & SHUKLA, M.K. Principles of Soil Physical. The Ohio State University Columbus, Ohio, 699p. 2004.

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, **R Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002

TIBANA, P.; TERRA, G.J.S.; Sequências carbonática do Cretácio da Bacia do Potiguar. **Bol. Téc. Petrobrás**, v. 24, n. 3, p.174-183, Rio de Janeiro, 1981.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R., PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J.. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num latossolo vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:1023-1031, 2004

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; DEXTER, A.R.. Quantification of the soil physical quality of A tropical oxisol using the s index. **Sci. Agric.** (Piracicaba, Braz.), v.65, n.1, p.56-60, 2008

TROEH R.F., THOMPSON M. L.; **Solos e Fertilidade do Solo**; Andrei Editora LTDA; São Paulo, p.718 2007.

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

THOMASSON, A.J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, v.29, p.38-46, 1978.

THOMAS, G.W.; HAZLER, G.R.; BLEVINS, R.L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test. **Soil Sci.**, 161:502-508, 1996.

VAN BAVEL, C. H. M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 14: 20-23, 1949.

VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 44, 892–898,1980.

VAN GENUCHTEN, M.TH; NIELSEN, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, 3, 615-628, 1985.

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

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; PINTRO, J.C; COSTA, A.C.S.C.; MUNIZ, A.S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum Maringá** , v. 24, n. 5, p. 1255-1264, 2002.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.31, p.263-275, 1994.

ANEXOS

ANEXO A. - Teores de carbono orgânico e matéria orgânica nos solos estudados.

Solos	C-orgânico	Matéria Orgânica (M.O)	
	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	%
Argissolo Vermelho	7.03b	12.11b	1.21b
Cambissolo Háplico	11.71a	20.19a	2.02a
Neossolo Flúvico	12.16a	20.97a	2.10a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ANEXO B - Médias da Densidade de partículas (ρ_s) e Densidade do solo (ρ) nas profundidades de 0 - 0,15 m.

Solo	ρ_s	ρ
	Mg m ⁻³	
Argissolo Vermelho	2.54	1.76a
Cambissolo Háplico	2.64	1.49b
Neossolo Flúvico	2.58	1.40b

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ANEXO C - Agregados > 2 mm, estabilidade de agregado por amostra (E.A.) e diâmetro médio ponderado na profundidade de 0 - 0, 15 m nos solos analisados.

Solos	E.A. (%)	AG. > 2 mm (%)	DMP (mm)
Argissolo Vermelho	62,90 b	26,14 b	1,27 b
Cambissolo Háplico	87,83 a	63,31 a	2,41 a
Neossolo Flúvico	66,95 b	37,93 c	1,58 c

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ANEXO D - Média da Porosidade total, macroporosidade e microporosidade na profundidade de 0 - 0,15 m.

Solos	Porosidade Total	Macroporosidade	Microporosidade
	(cm cm ⁻³)		
Argissolo Vermelho	0,307 c	0,041 b	0,265 c
Cambissolo Háptico	0,435 b	0,095 a	0,340 b
Neossolo Flúvico	0.547 a	0.033 b	0.514 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ANEXO E - Média da permeabilidade do solo ao ar (k_{ar}), porosidade de aeração (ϵ_{ar}) e continuidade de poros (k_1) dos solos na profundidade de 0 – 0,15 m.

Solos	k_{ar} (μm^2)	ϵ_{ar} (m^3)	k_1 ($\mu\text{m}^2 \text{m}^{-3}$)
Argissolo Vermelho	9.81	0.068	144.26
Cambissolo Háptico	39.66	0.127	312.28
Neossolo Flúvico	15.28	0.069	221,44

ANEXO F - Conteúdo gravimétrico de água ao longo das tensões (kPa) aplicadas no Argissolo Vermelho na camada de 0 – 0,15 m.

		Tensões (kPa)								
		0	2	4	6	8	10	33	100	1500
Repetições		Umidade g g ⁻¹								
Argissolo Vermelho	R1	0.189	0.168	0.152	0.142	0.132	0.128	0.100	0.082	0.059
	R2	0.197	0.188	0.163	0.153	0.140	0.134	0.097	0.077	0.066
	R3	0.213	0.187	0.159	0.145	0.134	0.129	0.098	0.080	0.057
	R4	0.186	0.174	0.158	0.156	0.148	0.145	0.113	0.092	0.069
	R5	0.251	0.202	0.177	0.165	0.152	0.146	0.111	0.091	0.067
	R6	0.196	0.181	0.157	0.141	0.127	0.123	0.089	0.071	0.050
	R7	0.217	0.196	0.174	0.166	0.155	0.149	0.120	0.104	0.082

ANEXO G - Conteúdo gravimétrico de água ao longo das tensões (kPa) aplicadas no Cambissolo Háplico na camada de 0 – 0,15 m.

		Tensões (kPa)								
		0	2	4	6	8	10	33	100	1500
Repetições		Umidade g g ⁻¹								
Cambissolo Háplico	R1	0.349	0.295	0.250	0.228	0.211	0.204	0.165	0.161	0.123
	R2	0.372	0.316	0.261	0.235	0.217	0.210	0.172	0.169	0.132
	R3	0.345	0.292	0.247	0.225	0.208	0.202	0.166	0.164	0.129
	R4	0.369	0.315	0.254	0.232	0.216	0.209	0.180	0.177	0.140
	R5	0.392	0.329	0.270	0.246	0.230	0.219	0.190	0.190	0.139
	R6	0.386	0.314	0.252	0.230	0.212	0.208	0.176	0.173	0.131
	R7	0.340	0.289	0.236	0.216	0.201	0.198	0.167	0.164	0.127

ANEXO H - Conteúdo gravimétrico de água ao longo das tensões (kPa) aplicadas no Neossolo Flúvico na camada de 0 – 0,15 m.

		Tensões (kPa)								
		0	2	4	6	8	10	33	100	1500
Repetições		Umidade g g ⁻¹								
Neossolo Flúvico	R1	0.412	0.383	0.375	0.366	0.359	0.355	0.320	0.295	0.281
	R2	0.332	0.315	0.310	0.304	0.297	0.293	0.265	0.250	0.214
	R3	0.402	0.365	0.361	0.354	0.347	0.343	0.310	0.285	0.268
	R4	0.455	0.412	0.407	0.398	0.395	0.389	0.358	0.335	0.299
	R5	0.415	0.398	0.391	0.379	0.373	0.369	0.340	0.316	0.294
	R6	0.419	0.399	0.396	0.386	0.384	0.376	0.340	0.319	0.278
	R7	0.366	0.361	0.349	0.344	0.341	0.338	0.307	0.287	0.244